



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材

系统科学与方法概论

陈禹 钟佳桂 编著



中国人民大学出版社
CHINA RENMIN UNIVERSITY PRESS



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材

系统科学与方法概论

陈禹 钟佳桂 编著



中国人民大学出版社
CHINA RENMIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

系统科学与方法概论/陈禹等编著.
北京:中国人民大学出版社,2006
(教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材)
ISBN 7-300-07067-1

I. 系…
II. 陈…
III. 系统科学-科学方法论-高等学校-教材
IV. N941

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 007110 号

面向 21 世纪课程教材 (Textbook Series for 21st Century)
教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材
系统科学与方法概论
陈禹 钟佳桂 编著

出版发行	中国人民大学出版社		
社 址	北京中关村大街 31 号	邮政编码	100080
电 话	010-62511242(总编室)		010-62511239(出版部)
	010-82501766(邮购部)		010-62514148(门市部)
	010-62515195(发行公司)		010-62515275(盗版举报)
网 址	http://www.crup.com.cn http://www.ttrnet.com (人大教研网)		
经 销	新华书店		
印 刷	北京宏伟双华印刷有限公司		
开 本	720×965 毫米 1/16	版 次	2006 年 2 月第 1 版
印 张	18 插页 1	印 次	2006 年 2 月第 1 次印刷
字 数	320 000	定 价	22.00 元

面向 21 世纪课程教材
教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材
编委会

主 编

陈 禹

中国人民大学

编 委 (按姓氏笔画为序)

方美琪

中国人民大学

王明明

中国人民大学

卞孔武

北京信息工程学院

甘仞初

北京理工大学

李 东

北京大学

陈国青

清华大学

张基温

江南大学

苏 俊

中国人民大学

贾 晶

天津财经学院

董小英

北京大学

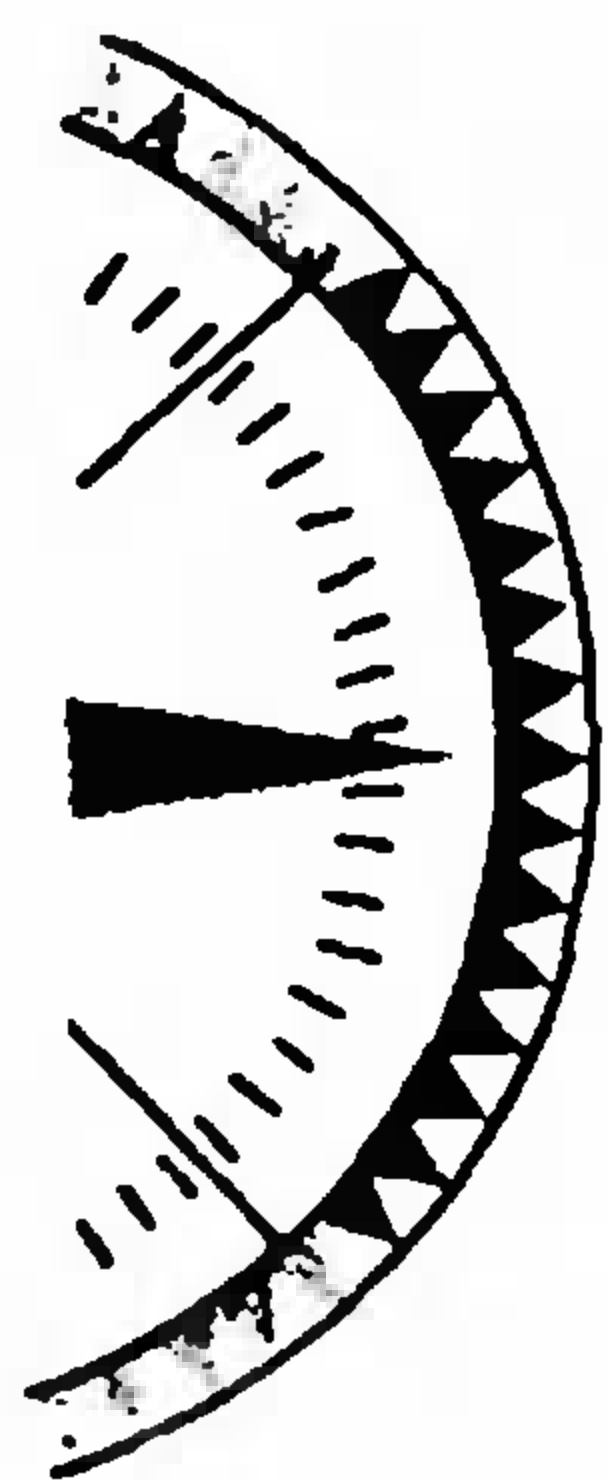
霍国庆

中国科学院研究生院

策 划

马学亮

中国人民大学出版社



教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材

总 序

自 1997 年教育部调整专业目录以来，新组成的“信息管理与信息系统”专业得到了非常迅速的发展。据统计，设置这个专业的高等学校已经接近 500 所。随着信息化建设的进一步深化，社会各界对于信息管理人才的需求越来越多，要求越来越高。特别是电子商务和电子政务的兴起、物流管理的发展以及信息主管（CIO）的出现，使得这种需求的增长趋势更为引人注目。这表明，“信息管理和信息系统”作为管理科学的一个重要分支，不但没有由于某些泡沫的破灭而销声匿迹，而是健康地、稳步地、越来越快地向前发展。培养这方面的专业人才已经成为信息时代不可缺少的一个重要方面。

当初由 5 个分别来自工学、管理学等不同门类的学科，组成“信息管理与信息系统”这个新学科的时候，曾有不少同志对之表示过疑虑：这些背景不同、来源不同的学科能够形成一个有确定内涵、有统一培养目标和学科体系的新学科吗？几年来的事实已经给出了肯定的回答。信息化建设的实践已经表明，信息技术的巨大潜力只有同各行各业的具体业务紧密地、有机地结合在一起，才能充分地发挥出来。它与商业，特别是营销活动的有机结合，派生出了越来越广泛的电子商务；它与政府工作的具体实际相结合，引出了方兴未艾的电子政务，如此等等。现代信息技术这支“利箭”，必须切实瞄准各行各业的业务需求这个“的”，做到“有的放矢”，才能真正发挥作用。现代信息技术造就了“利箭”本身，但是并没有回答如何做到“有的放矢”的问题。正因为如此，近 20 年来，许多学校苦于没有合适的教材，而只是简单地用计算机专业

的部分教材，加上管理专业的若干教材，形成了所谓“拼盘式”的教学方案，以致“矢”和“的”两张皮，没有实现交叉与融合的初衷。出现这种情况的原因，在于我们对信息管理的内涵与实质还没有深入理解。简单地把“矢”和“的”罗列出来，还没有达到“有的放矢”的高度。要做到“有的放矢”，必须认真地研究和认识人们做事的规律。这就是美国著名学者赫伯特·西蒙提倡的“关于人为事物的科学”，也正是我国著名学者许国志先生提倡的“事理学”。具体到教材来说，要求我们针对“有的放矢”的要求，编写具有本专业特色的，真正能够回答如何做到“有的放矢”的教材。这种教材的立足点在于如何在各行各业用好信息技术，而不是信息技术本身，与介绍“矢”本身的教材是有根本区别的。这就是我们组织编写这套教材的出发点。

从 20 多年的实践中，我们深深地体会到信息管理和信息系统这个新专业具有的特点：综合性、实践性、新颖性。从传统的学科分类体系看，这个专业确实有点“不三不四，非驴非马”，然而这正是它的特色与生命力所在。它在实践中的发展非常迅速，以致人们常常困惑于新名词、新概念的层出不穷，然而，这也正是它与社会实践相互促进、相互影响的具体表现。当今时代（包括技术与社会）确实变化太快，理论研究与学科建设不得不追着实践跑步前进。这也许可以为这 20 多年来一直困扰着这个专业的种种议论和非议，找到一点根源和缘由。

当然，这并不等于为理论研究的不足找借口，也不等于这个专业根本就没有理论，或者不需要理论思维。恰恰相反，实践的源头活水为人类深入认识和掌握“事理学”的规律提供了持续不断的推动力和取之不尽的营养和素材。我们相信，以信息化建设的伟大实践为背景和基础，信息管理和信息系统这个专业一定会继续迅速健康地成长，逐步走向成熟和完善，最终成为人类知识宝库中一个有机的、不可缺少的一部分。

基于上述认识，我们对于“信息管理与信息系统”专业教材的理解，就和一般的专业有所不同。在内容的选择上，我们把视野放得比较宽。作为综合性、交叉性、实践性非常突出的一个学科，开阔学生的眼界是非常重要的。我们的信条是：“不是给学生金条，而是给学生点金的手指；不是给学生将来要用的具体知识，而是为学生终身的主动学习打好基础。”具体地说，对于现代信息技术的各个领域，让学生对将来可能用到的“利箭”有广泛的了解；对于当今社会应用信息技术比较广泛的各个领域，让学生对于目标，即“的”有所了解和准备；对于科学的认识论和方法论，是为学生如何做到“有的放矢”做准备的。因此，我们考虑了从计算机、通信等基本技术到信息安全、数据挖掘

等一系列课程。其次，我们考虑了企业的信息管理、电子商务、电子政务以及物流管理等方面。再次，主要是系统科学的内容。简单地说，就是这三个方面构成了我们这个学科的三大支柱。

与此相关，本套教材的另一个特殊的地方就是它的使用方法。我们绝不是认为任何一个学校的“信息管理与信息系统”专业，包括我们自己，都必须开设这里列出的所有课程。我们认为，各学校必须根据自己的具体情况和环境，有重点、有选择地设计符合自己学校的教学计划。教育是实事求是的、需要因势利导的艺术。教条和僵化与培养创新型人才是水火不相容的。我们希望尽可能地为同行的各位老师，提供充分的选择余地，而不是设置新的条条框框。

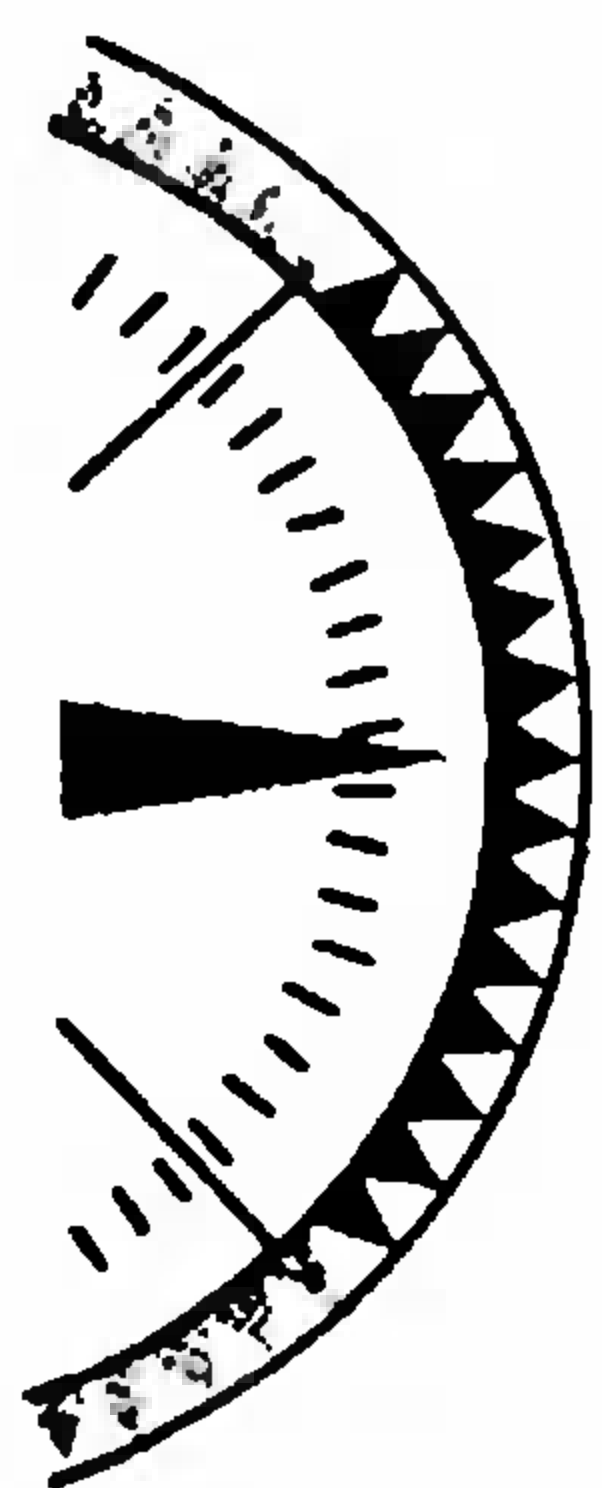
另外，需要说明的是有关教学方法。从前面的说明很自然地引出，我们的教学方法必须简明扼要、突出实践。每门课程的时间短一些，开设的课程多一些，少讲一点，多练一点。所谓突出实践，包括两个方面，直接联系社会实践，充分利用实验条件。在有条件的课程和章节，尽可能地为创造直接接触和了解最新的社会实践的机会。同时，大力建设实验室，为学生动手提供现代技术（包括教育技术）支持的平台和环境。关于这方面，我们正在准备另外一套课程和教材。

总之，这个学科是相当年轻的，相当不成熟的。我们编写这套教材，并不是表明我们已经有了完全成熟的想法，而是为了总结已有的认识，与同行共勉和交流，共同推动这个学科的发展。因此，我们真诚地期待着同行和社会各界的批评意见，因为，只有通过集思广益、互相切磋，才能逐步形成比较成熟的、新的学科体系，这是人类认识发展的规律，也是任何新学科成长的必由之路。

中国人民大学 信息学院

陈禹

2005年5月29日 于北京



前言

“信息管理与信息系统”专业的显著特点之一是它的方法论特色。与作为“矢”的现代信息技术和作为“的”的管理基础理论相并列，系统科学和系统工程的思想是这个学科的三个主要支柱之一。它的作用就在于实现“有的放矢”的基本理念。系统科学的前辈，著名学者许国志先生曾提出，我们不仅需要反映物质运动规律的物理学，而且需要归纳总结人是如何做事的“事理学”，这对于培养真正能够符合社会需要的人才是非常重要的。系统科学就是这样的新型学科之一。我们平时常说“要系统地做事”，“要按系统工程的方法做某某事情”。那么，究竟怎样做事才称得上是“系统地做事”，所谓“系统工程的方法”究竟是什么，这就需要专门学科来回答。系统科学这门学科就是回答这些问题的。如果说，培养学生分析问题、解决问题的能力是任何学科都需要注意的事情，那么，对于“信息管理与信息系统”这样具有明显方法论性质的学科，这点就更加重要、更加迫切了。正因为如此，我们把《系统科学概论》列入了这套教材。

系统科学是一门总结复杂系统的演化规律，研究如何建设、管理和控制复杂系统的科学。它具有以下4个基本特点。

(1) 它的核心是系统科学的理念，即系统思想的基本观点和思维方法。可以说，学习系统科学，最重要的是掌握一套不同于传统观念的、建立在现代科学基础上的思想和观念，如全局观念、层次观念、动态观念、演化观念等。

(2) 它以数学和运筹学提供的、一系列定量分析的工具和算法为基础。这

使得它所主张的理念具有可操作的实现能力。这是这个学科不同于哲学领域和一般方法论之处。

(3) 它和计算机科学与技术紧密联系在一起,并以计算机为研究和观察复杂系统的技术手段。正如人们所说的,计算机是系统科学的实验室。无论是学习系统科学,还是进行系统科学的研究,计算机都是必不可少的环境和手段。

(4) 它是以现代科学的许多成果为素材的实际例证。作为科学方法的总结,它不是孤立存在、凭空臆造出来的。学习和领会系统科学的理念,必须广泛了解和体会现代科学许多学科的最新成果。而系统科学的研究与发展也必须紧密结合各种不同类型的学科实际。离开了与背景学科的紧密联系,系统科学的研究就失去了源头活水。这也是我们在学习和研究系统科学时必须注意的。

从上述特点,我们可以看到,系统科学的内容是非常丰富的。作为为本科生开设的一门课程,没有可能,也没有必要全面地、详细地介绍有关细节。如果要了解这些,读者可以阅读许国志先生主编的《系统科学》一书。(上海科学技术教育出版社,2001年出版。)

本书为“信息管理与信息系统”及相关专业的本科生初步了解现代系统科学提供一个基本的框架。基于这样的定位,本书内容编写原则就是,既要在一门课的有限时间里给学生比较全面、准确地介绍学科轮廓,同时又要考虑目前大多数学校的现实条件。

根据以上情况,全书共分五章,第一章介绍现代系统科学的主要思想及其研究对象、学科特点等一般议题。这一章的目的是给学生初步的概念。第二章介绍现代系统科学形成的背景和过程,从历史的角度勾画出学科的状况。第三章介绍系统科学的现状,概括地、通俗地讲述当今系统科学的主要研究领域。在这一章中,对于有关的研究内容和方法进行了扼要的介绍。第四章则对利用计算机建模进行系统科学研究的具体方法进行了介绍。由于目前国内有 Swarm 的单位比较多,所以我们以 Swarm 为例来讲解。本章主要介绍实际操作的技术和方法,对于准备进行该领域研究的学生,这是很有必要的。第五章则介绍案例,一方面是为了加深学生对系统科学理念的体会,另一方面是为读者提供进行系统科学研究的参考和启发。

本课程的特殊性决定了本教材的使用方法也应当与其他教材有所不同。在此需要强调以下几点。首先,以传授理念为主,不要陷入技术细节之中。数学和计算机技术的细节在研究工作中是会占用许多精力的,但是教学不能这样,如果用大量时间讲解这些,就会喧宾夺主,达不到建立正确理念的目的。其次,要尽可能地结合本学校、本单位的具体情况,选择好作为背景的具体领

域，并设计自己的、有针对性的案例。本教材提供的案例仅供参考，一般来说没有必要逐个讲解，而是要有选择地讲，最好结合本单位、本行业的生动案例。第三，一定要实验教学与实验条件相配合。系统科学的实践性很强。空洞地讲理念是十分枯燥乏味的，应当努力建立和利用实验条件和环境，把课上得生动活泼。另外，第三章内容多、涉及面广，需要根据本校、本专业的具体情况有所挑选、有所侧重，有些则可以不讲，特别是涉及比较深奥的数学和运筹学内容。还需要说明的是，系统思想和理念的培养不是仅仅通过一门课就可以完成的。在其他的课程中也需要体现和培养。例如，“管理信息系统”，“信息系统的分析与设计”等课程都需要强调和灌输系统科学的思想。本书仅是一个集中的强化。

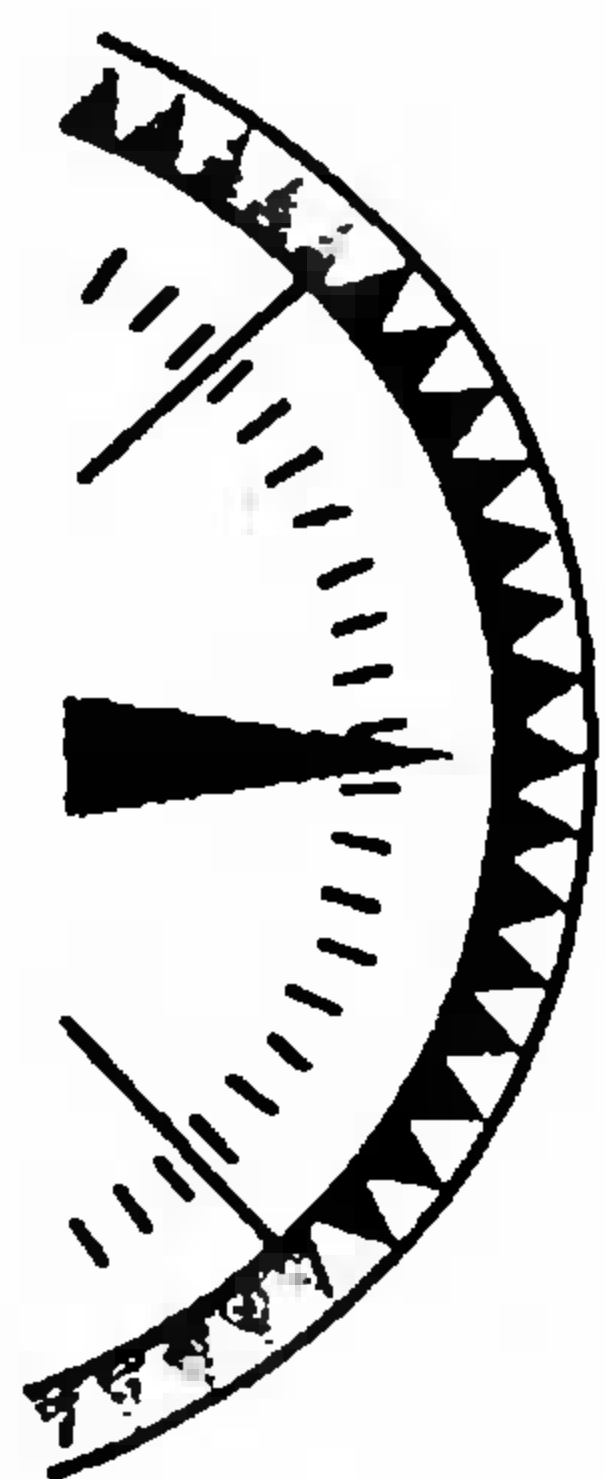
本书的撰写过程很长。最早的酝酿可以追溯到 10 多年前。中国人民大学信息学院在 20 世纪 90 年代初就开始开设分形等有关课程。由于没有合适的教材，一些师生开始编写提纲和实例。许多教员在结构讨论、资料积累、文献翻译、软件开发、案例收集等方面做了许多工作，其中有方美琪教授、叶向副教授、周晓牧副教授，学生刘玉国、全录平等也曾承担了许多工作。其后历届研究生都为本书的积累做出了贡献，其中赵光、熊辉、韩晖、饶京海、苏小萌、郝杰、陈冬梅等尤为突出。在 10 多年积累的基础上，经集体讨论详细提纲后，具体编写者为：陈禹（第一章）、钱颖（第二章）、杨舟（第三章）、井庚（第四章）、锁曙光（第五章）、钟佳桂（全书统稿）。

作为为本科生编写的系统科学教材，本书是初次尝试，无论是内容，还是结构都会有一些不妥之处。为了把“信息管理与信息系统”专业办好，我们不揣冒昧、抛砖引玉，出版本教材，希望得到同行和各界专家学者批评指正，以帮助这个专业健康地发展和成长。

中国人民大学 信息学院

陈禹

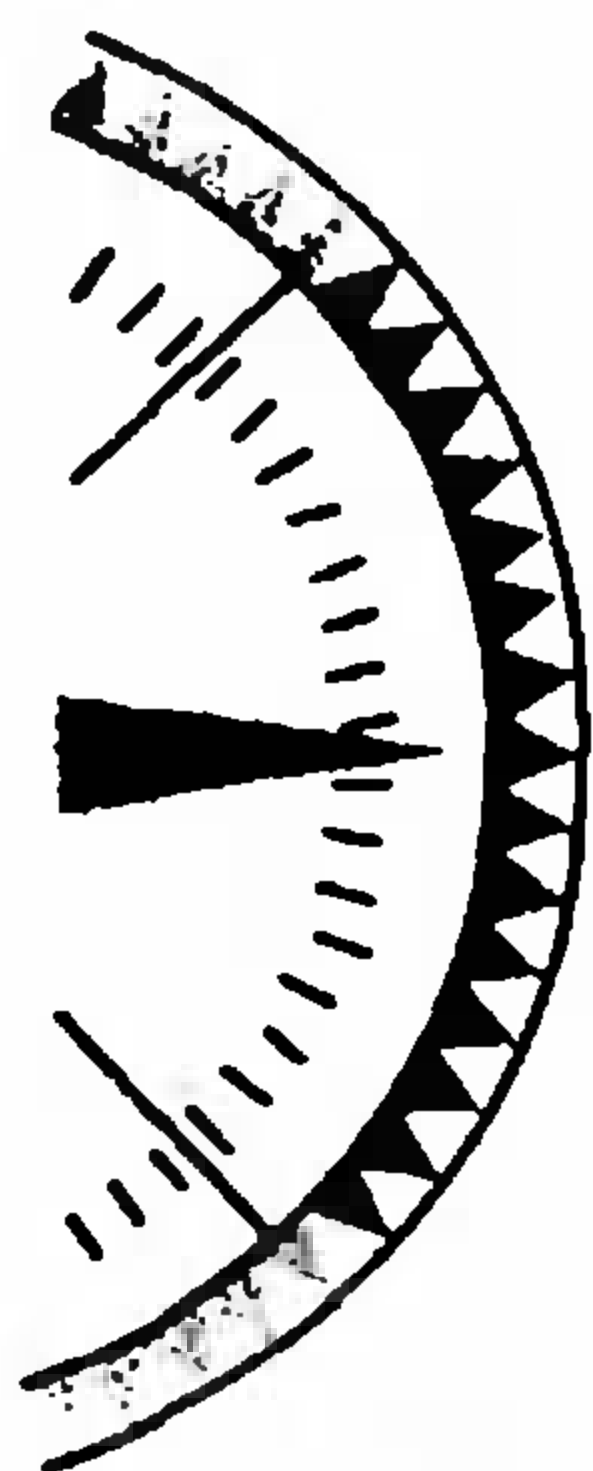
2005 年 8 月 29 日 于北京



目 录

第一章 导言	(1)
第一节 系统科学的意义.....	(2)
第二节 现代系统科学的基本理念.....	(9)
第三节 系统科学的研究方法与工具	(14)
第四节 学习系统科学的目的和方法	(21)
第二章 系统思维的由来	(29)
第一节 古代系统思维的萌芽	(30)
第二节 近代科学思想中的系统思维	(37)
第三节 现代系统科学的兴起和发展	(46)
第三章 系统科学的内容和范围	(63)
第一节 复杂系统状态的表达方式	(64)
第二节 分形和分数维的点集	(70)
第三节 迭代函数系统 IFS	(74)
第四节 Logistic 方程	(81)
第五节 元胞自动机和人工生命	(88)
第六节 简单巨系统的演化理论	(93)
第七节 CAS 理论的观点和内容	(101)
第八节 复杂网络结构研究与社会网络分析.....	(117)
第九节 复杂系统鲁棒性研究.....	(128)

第四章 计算机建模工具	(135)
第一节 Swarm 建模平台	(135)
第二节 用 Swarm 建模	(138)
第三节 Swarm 的类库	(143)
第四节 Swarm 的安装与配置	(147)
第五节 基于主体的建模平台.....	(158)
第五章 系统科学的应用	(168)
第一节 系统科学研究的一般方法.....	(168)
第二节 案例.....	(179)



第一章

导 言

内容提要

现代系统科学是 20 世纪中期以来科学领域中令人瞩目的新发展之一。这一学科的兴起，是人类对于系统和复杂性长期认识过程的延伸，也是在现代信息技术的推动下，人类社会、经济和思想正在发生深刻变革的重要组成部分。

系统科学是一门关于思维方法的学科。它研究的是人类认识和控制复杂系统的一般思想和方法。作为一门方法论性质的学科，它在自然科学与社会科学的大量实际成果的基础上，集中地研究人们观察客观事物的方法，以及人们有效地做事的方法。所以它的应用领域和影响范围是非常广阔的，正因为这样，今天它已经成为现代社会中管理者和决策者必不可少的思想武器，得到了学术界和全社会越来越多的关注。

学习和研究系统科学包括两个基本的方面：建立系统科学的若干基本概念，掌握系统科学的常用研究方法。

在基本的理念方面，现代系统科学强调的、与近代科学形成鲜明对比的主要观点包括以下七个方面：强调整体性的观点、注重动态和过程的观点、注重质变的观点、注重层次的观点、深入研究和重视不确定性、重视人为事物和做事方法、关注和研究多主体系统。

在研究的方法和手段方面，需要提出和掌握的有关问题和技术有以下六

点：多主体概念模型的建立和研究、复杂网络模型的建立和研究、基于海量数据的数据挖掘和分析、基于计算机模拟的实验研究、从定量到定量与定性相结合的研究、关于不确定性的研究。

作为导言，本章第一节首先说明系统科学的基本概念和含义、研究内容及其与相关学科的联系与区别；第二节和第三节分别从理念和方法两个方面阐明观点和基本的框架，以期建立对现代系统科学的基本的理解；第四节则说明本课程的学习目的与方法、需要注意的问题以及全书的内容安排。

第一节 系统科学的意义

系统科学这个名词对于许多人来说，还是比较生疏的。究竟什么是系统科学？什么是现代系统科学？还存在着许多误解，甚至偏见。所以我们有必要首先明确一些基本的概念和观点。本节我们将从什么是系统科学谈起，概括地讨论：系统科学究竟是研究什么的，包括哪些内容，它与其他一些相关学科的关系是什么，并澄清一些误解，明确我们的研究对象。由于目前的研究常被称为复杂性研究或复杂性科学，下面将对复杂性研究（Complexity Study）的概念和含义进行必要的说明。

一、什么是系统科学

系统科学一词现在越来越多地得到使用，它和系统思维、系统方法、系统工程用语一起，形成了“系统热”。这表明人们对于它的重视和期盼。然而，给它下一个确切的定义，并不是一件容易的事情。究竟什么是系统科学呢？就本书的讨论范围而言，可以对它做如下说明。系统科学是人类对于复杂系统规律的认识的总结；它在自然科学与社会科学各领域的大量实际经验的基础之上，总结出人类认识、描述、设计、管理、控制复杂系统的一般性的理念、方法与具体步骤，用以加深人类对于宇宙的认识，提高人们做事的效率和有效性。

对此我们可以从以下三个方面加以理解。

首先，系统科学是一门跨领域的、研究一般性的、方法论性质的科学。它所研究的是人类认识与管理所有复杂系统的、一般的理论与方法，既包括自然科学，也包括社会科学；既包括物理、化学等无生命的系统，也包括生物、生态系统、社会系统等活的、有生命的系统；既包括由具体事物构成的实际的、

物质的系统，也包括由概念构成的、抽象的、理论上的系统。正像人们常说的，系统无处不在。正因为如此，系统科学的思想与方法得到了现代社会各学科、各领域人们的普遍重视。

其次，系统科学包括了认识世界和改造世界两个方面。一方面，它通过总结大量实际经验，为我们认识变化万千的客观事物提供帮助，以便从复杂的现象中找出内在的联系和规律，这就是它的认识论功能。然而，认识世界是为了改造世界，认识复杂系统是为了改造、管理、控制复杂系统。系统科学的更重要的作用在于提供解决问题的思路和方法。正是这一点使得广大从事实际工作的专家学者，把目光投向了系统科学，试图从中寻找有效做事的方法。可见，系统科学绝不是脱离实际的空谈，而是具有鲜明的实践性的学科。

还需要注意的是系统科学强调的可操作性。正是在这一点上，它不同于传统学科中的一些主要进行思辨的学科，如哲学。系统科学与数学、运筹学有着密不可分的关系。它不但需要明确解决问题所需要的理念与思路，而且非常强调实际做事的步骤与操作方法；不但给出定性的判断，而且要找出定量的界限与标准。这就使系统科学不同于单纯的思辨，对于实际工作具有十分具体、十分现实的意义。

二、复杂性——现代系统科学的研究对象

从上面的说明可以看出现代系统科学的研究对象可以概括为复杂系统或者说复杂性。显然，如果我们面对的问题因素不多见，可以用我们已经有的逻辑思维方法加以分析和认识，那么就没有必要再提出系统思维的问题。系统和复杂性这两者从来就是不可分割的，所以我们说的系统科学自然主要是指对于复杂系统的研究。（关于系统的分类，从来就有许多不同的视角，例如，可以把系统按照复杂性的不同情况分为简单系统、简单巨系统、复杂巨系统、开放的复杂巨系统等。关于这些概念和视角的详细研究，读者可以阅读有关的专门著作，如许国志先生主编的《系统科学》，在这里我们把复杂性研究与系统科学作为一个整体进行介绍，对于其细微的区别和联系就不再展开叙述了。）

事实上，人类关于系统和复杂性的思考，可以追溯到两千多年前的中外古代思想家。虽然受到生产力与技术水平的限制，他们的思想往往表现为“天才的猜测”，其智慧的光辉至今令人折服。以培根、牛顿为代表的近代科学，为许多关键性的技术手段提供了理论基础，在 300 多年中，创造了人类社会前所未有的文明和繁荣。近代科学对于人类文明的巨大贡献是毫无疑义的。然而，和任何事物都具有相对性和局限性一样，近代科学并没有也不可能最终完成人

类对世界的认识。人类思想的发展也不是直线前进的。由于种种条件和环境的限制，近代科学的思想和方法不可避免地带有时代的局限性。就对系统和复杂性的认识而言，近代科学在强调分析方法时，在相当程度上忽视了整体、动态、层次、演化等重要思想和概念，造成了“只见树木、不见森林”的偏颇。随着生产力的不断发展，以及生产社会化程度的不断提高，这种思想方法上的片面性，越来越表现出它的局限与不足，越来越不能适应科学与社会发展的实际需要。现代系统科学正是在对于这种现象的反思中诞生和成长起来的。

因此，系统科学，或者说复杂性研究是一个既古老又年轻的学科。一方面，自古以来，许多中外学者都已经从各种不同的角度、以不同的方式对于系统和复杂性进行了研究与阐述，从这种意义上讲，它无疑是一门非常古老的、历史悠久的科学。另一方面，近几十年来，无论在理念的深化方面，还是在技术与方法方面，人类对于系统和复杂性的研究都取得了突破性的进展，它正在重新形成其体系和架构，经历了凤凰涅槃式的再生过程。

经过以上简单的回顾，我们可以形成这样的一个基本的看法：古代的许多思想家（包括东方和西方）都曾经认真地思考过有关系统和复杂性的各种问题。在他们那个时代，学科还没有分得那样细，他们往往都是通晓当时人类各种知识的全才。正因为如此，他们比较注意从全局、从根本上去把握事物，从而能够形成比较准确、比较符合客观实际的，因而也是比较科学的观点。当然，由于历史与技术条件的限制，他们的这些观点不可避免地带有许多猜测，甚至神秘主义的成分，有些内容今天看来是不成熟的，甚至是幼稚可笑的。但是，和个人的思想发展过程一样，人类也必然经历从幼稚到成熟的成长过程，这是不足为怪的。

在这个发展潮流中，复杂性是一个重要议题。什么是复杂性？它从何而来？人类是怎样认识和处理复杂性的？这些根本性的理论问题，同时也是人类面临的极为现实的问题，要求现代科学给出正面的回答，以揭示复杂系统的行为规律为己任的现代系统科学，显然应当担负起这个任务。正因为这种情况，国内外许多学者不约而同地把系统科学的研究重点，放到了复杂系统（或称开放的复杂巨系统）上。这是近年来，系统科学发展中的一个十分显著的趋势。

三、系统科学和复杂性研究的内容

根据以上分析，笼统地讲，系统科学的研究内容可以分为以下三个方面。

（1）对于系统和复杂性的认识和理解：即对于复杂系统和复杂现象的状态

和描述方法的研究；

(2) 对于系统的发展和演化的研究，或者说研究复杂性从何而来：即对于复杂系统的动态属性与演化规律的认识和理解；

(3) 设计、管理和控制系统，特别是复杂系统的方法：即人们应当如何做才能有效地设计、管理与控制复杂的人造系统。

当人们面对某个复杂的问题时，首先面对的课题是如何认识和描述问题。如果事情涉及的因素只有很少几个，因果关系十分明确，那么，我们就能够运用寻常的逻辑推理或简单的计算迅速地找到答案。然而，这显然谈不上是复杂的问题。随着人类活动范围越来越大，要处理的问题涉及的因素愈来愈多，相互制约的因果关系越来越复杂，直线式的简单推理已经无能为力。比如，环境保护问题、国际经济问题、世界人口问题、土地荒漠化问题、全球温室效应问题、计算机网络安全问题、抵御恐怖袭击问题，等等。事实上在今天的人类社会中，没有一个实际问题是可以从单个因素或简单的因果推理得到解释和答案的。人们曾经把数学公式作为描述客观规律的主要工具，这在工业时代曾经取得了巨大的成功。然而，从 20 世纪中叶以后，问题变得越来越综合、越来越错综复杂，许多问题已经无法用简单的数学公式来描述，而且往往是给出了公式，也没有可以实现的具体算法。正是针对这种状况，系统科学为这种多因素的、关系错综复杂的，包含许多不确定性的问题的理解和描述提供了一系列方法（如建立模型、进行计算机模拟、绘制各种图示等），直到引进混沌、分形等新工具。

如果说对于系统的静态描述已经变得越来越复杂，那么，对于现实问题的动态研究则显示出更加复杂多变的状况。随着时间的推移，系统的状态将不断地演变与进化。这种演变与进化不只是量的变化，而且往往伴随着新的现象与规律的出现，这被称为“涌现”（Emergence）现象。这方面的典型例子就是电子商务和网上社区的出现。从上个世纪的末期开始，随着计算机和网络技术的普及，许多以前从来没有过的事情出现了，网上的 BBS 社区网站的作用和发展、网上购物的发展、计算机黑客的出现等，这些新的现象是怎么出现的、有什么规律、哪些是发展的必然趋势、哪些是来去匆匆的泡沫，要回答这些问题，不仅需要全面地考虑有关的因素，而且要细致地分析它们之间错综复杂的相互制约与促进作用，对整个发展的过程和趋势进行极其细致的分析。

在以上两个方面的基础上，针对这些现实问题，制订科学的管理与控制方法，这是我们研究系统科学的根本目的。传统的管理方法是把整体和个体对立起来，把人当作生产线上的零件，这种方法在工业时代曾经发挥了很大的作

用。但是到了信息时代，主体意识苏醒了，人们的个性化要求越来越高，在这种情况下，“我拨你动”，把被管理者当做棋子的管理与控制越来越行不通了。新的、更加人性化的管理与控制，正是基于对于复杂系统的状态与发展规律的认识，承认多种利益主体的客观存在，细微地、科学地进行分析和研究，充分调动各种因素的积极方面，这才是制订科学、有效的政策的正确方法，才能做到“四两拨千斤”，形成和谐的、协调的社会环境。

在以上三个方面，系统科学都已经有了许多值得关注的成果，其成果分别以各种不同的名称发表，如系统工程、设计科学、复杂性研究等；有兴趣的读者可以参阅有关的专著与教材，例如许国志院士主编的《系统科学》一书。

这里需要特别说明一下复杂性研究的含义。从概念上说，围绕复杂性有两个基本问题需要明确。一个问题是：什么叫复杂性，它指的是什么？另一个问题是：复杂性的哪些问题需要研究？它究竟研究哪些问题？

关于第一个问题，人们有着许多不同的理解。我国著名系统科学专家钱学森等在1990年的一篇重要文章中，把开放的复杂巨系统这一概念规定为以下四点：(1) 系统的子系统间可以有各种方式的通信；(2) 子系统的种类多，各有其定性模型；(3) 各子系统中的知识表达不同，以各种方式获取知识；(4) 系统中子系统的结构随着系统的演变会有变化，系统的结构是不断改变的。

该文还定义了“开放”的含义：“这里的开放性是指系统与外界有能量、信息或物质的交换。说得确切一些：(1) 系统与系统中的子系统分别与外界有各种信息交流；(2) 系统中的各子系统通过学习获取知识。”

国外的学者也有类似的论述。例如 J. Holland 在《隐秩序》中强调系统的复杂性是由个体的适应性造成的，它会在环境的影响下改变自身的结构与行为方式，并且由此产生分化、分工，以致整个系统状态的变更。这与上面所引的我国学者的看法是一致的。也有一些其他的说法，例如，卡斯蒂 (J. Casti) 把复杂性定义为意外 (Surprise)，定义为固有模式的失效。他把复杂性科学称为关于意外的科学。

综合起来，可以把复杂性描述为以下几个方面。

- (1) 有较大的规模；
- (2) 子系统、元素或个体具有主动性，不但能够与外界包括系统内和系统外进行信息、能量、物质的交流，而且会根据经验改变自身，简言之，子系统是活的；
- (3) 系统是动态的，随着时间的推移，宏观和微观尺度都在不断变革；

(4) 系统的功能与行为复杂, 难以预测。

在英文的文献中, 一些学者强调复杂性与一般繁杂的区别, 在英文中前者用 Complexity, 后者用 Complicated。例如, 一堆沙子, 元素的数量很大, 但都是同一类型的, 而且是“死”的。这样的系统就只能说是繁杂, 而不是复杂。因此, 我们可以体会到中外学者所说的复杂性是有一定范围的, 而不是笼统地只要规模大, 子系统数量多就是复杂系统。

至于第二个问题, 复杂性研究的内容是什么? 我们从事复杂性研究的目的是什么?

从已有的研究工作来看, 主要的注意力集中在以下几个方面:

(1) 复杂系统的一般性质和行为规律。如不确定性、突变、分化、稳定性等概念和规律。

(2) 复杂系统的建模和描述方法。如面向对象的方法、多主体交互作用的方法等。这包括形式化模型、数学模型、计算机模拟模型等。

(3) 复杂系统行为的研究。特别是复杂系统演化规律的研究。

(4) 复杂系统的模拟与行为预测。这主要是用计算机模拟的方法进行试验和分析, 这方面的工作往往与计算机技术结合在一起。

(5) 特定类型的复杂系统的研究。例如, 复杂适应系统、经济系统、社会系统、生态系统、动物种群系统等。这方面的工作往往和具体的应用研究结合在一起。

(6) 有关的工具和软件的研究。由于这方面的大量需求, 已有一些研究单位在这方面提供了较好的平台。

(7) 有关的一些哲学或理论问题的研究。例如认识的界限问题, 是否存在人类无法超越的复杂性界限? 又如, 复杂性是客观世界本身的原性, 还是由于人类的认识能力而造成的现象, 即复杂性这个概念是本体论概念还是认识论概念, 等等。

据圣菲研究所的学术联系网络报导, 全世界有上百个大学和研究所进行以上各种问题的研究。每年发表的论文, 仅在圣菲研究所列入工作论文的就有近百篇, 还有许多专著出版。

四、系统科学与相关学科的关系

作为现代科学的一个有机的组成部分, 系统科学不是孤立的, 它与现代科学的各个领域的发展是密不可分的。

说到和其他学科的关系, 首先提到的当然是数学。作为科学的语言, 数学

是人们用来描述和研究系统的基本工具，这在科学领域几乎已经是公认的认识。任何学科，只有到了能用数学公式和模型表达其规律的时候，才开始被认为称得上是科学。所以，关于系统科学的许多重要进步，往往是从数学中开始的。而且，现代系统科学从数学中引用了许多重要的工具和方法。至今在中国科学院，数学和系统科学还属于同一个学院。然而系统科学与数学还是有区别的，他们的主要区别在于：数学研究的是客观事物的数量关系和空间形式，而系统科学则以事物的演变机制和质的变化为研究对象。量和质是不可分割的，但又是具有根本性区别。

从方法论的角度来看，系统科学与哲学在许多方面有着非常紧密的联系。古今中外许多哲学家对于系统科学的理念，曾经做出过精辟的阐述。系统科学的许多理念，与辩证唯物主义的哲学观点是相一致的、相呼应的，如量变和质变的相互联系与转换，世界在质的方面的多样性和无限性，事物的相互联系与动态演变，等等。研究系统科学必须有哲学观点的支持和指导。两者的区别在于系统科学强调的实践性和可操作性。可以说系统科学是哲学和应用科学之间的一个中间环节。它致力于用具体的、可以实际操作的工作步骤和实现技术落实了辩证法的理念和观点。

在实施和操作的层面上，计算机科学与技术是系统科学不可缺少的基础和手段。美国著名系统科学的专家克里尔（G. Klir）曾经说过“计算机是系统科学的实验室。”正像物理、化学离不开相应的实验室一样，现代系统科学也不可能离开计算机。通过建立模型、进行模拟、数据处理等环节，计算机技术对于人类研究和认识复杂系统起到了不可替代的重要作用。正是因为有了计算机，人们才有可能突破时间、空间、资金等制约条件，对于从宇宙到社会的各种不同类型的复杂的系统进行考察。可以说，如果没有计算机技术，现代系统科学的发展是不可想象的。

还应当提到的是应用系统思维的各种具体的领域，如环境科学、工程控制、经济管理、金融业等在当今社会上成为热点的领域，正是这些学科中涌现出来的大量实际课题，促使和推动了系统科学的蓬勃发展。这些领域的应用不仅吸引了大量的社会资源，投入对于系统工程和系统科学的研究，而且为系统科学与系统工程的实施提供了广阔的舞台和用武之地。所以，系统科学的研究工作必须不断地从这些实际领域吸取灵感和推动力。

最后还应当提到系统工程。广义地讲，系统工程是系统科学的一部分，它是系统科学的理念的具体实现。由于其在实际中的重要作用，系统工程更加引起人们的关注，比系统科学更加引人注目。本书主要介绍的是系统科学的理念

和研究方法，所以不准备在系统工程领域进行深入讨论，有兴趣的读者可以阅读有关的专著，如许国志先生主编的《系统工程的理论与实践》。

第二节 现代系统科学的基本理念

作为一门方法论性质的学科，系统科学的提出，首先是强调若干基本的思想和理念。正是这些理念能够有效地帮助我们摆脱传统思维方式的束缚，在现实工作中取得更大的自由。概括地说，这些观点可以归纳为以下7个主要方面：强调整体性的观点；注重动态和过程的观点；注重质变的观点；注重层次的观点；对于活的、多主体系统的关注和研究；对于不确定性的深入研究和重视；对于人为事物和做事方法的重视。下面我们将对这些理念进行简要的说明。

一、强调整体性的观点

整体的观点，即认为宇宙，以及各种层次上的复杂系统是不可分割的整体，只有把握全局，才能真正认识与掌握它。从表面上看，这种观点是人人都能够承认的，没有疑义的。有谁会否认宇宙或复杂系统是一个整体呢？事实上，对于这种整体观的理解与把握始终是辩证法和形而上学的基本分歧之一。对于这个问题，正是亚里士多德的表述“整体大于它的各部分之和”，一针见血地指出了问题的要害。不少情况下，人们表面上承认总体的存在，然而事实上却把它作为各部分的简单累加或拼凑。这种观点隐含的前提就是：“整体等于它的各部分之和”。这里的一字之差反映了对待客观世界本质的两种根本对立的看法。

科学的整体观认为：分解只是人类认识复杂事物的方法之一，当我们把一个复杂事物分解为它的各个组成部分的时候，这些部分就已经失去了作为整体的一个部分的一系列关键属性。当人们解剖一只青蛙的时候，切下来的肌肉已经不再是活的青蛙的一部分，它的运动规律、属性已经变了样。因此，整体不是它的各部分的简单累加，当若干部分组成整体时，便有新的质产生。往往正是这种新的质，体现了该整体的特有的性质与功能。当系统瓦解，各个部分各行其是时，这些新的质也就不复存在了。分解，或者还原论的方法无疑是需要的、有益的。然而，综合的、整体论的方法同样也是必要的、有益的。系统的规模越大，情况越复杂，综合方法的重要性就越显著。

然而，形而上学观念中的“整体”却不具备这样的性质。既然“整体等于

它的各部分之和”，那么，在部分组成整体时，就没有任何新东西产生，除了各部分的属性之外，整体本身没有任何实质性的功能与性质。按照这种观点，认识复杂事物，就是认识它的各部分，只要把各部分认识清楚了，整体也就自然而然地清楚了。事实上，无数事实已经表明，这种想当然的“自然而然”是不符合客观实际的。了解了齿轮和杠杆的原理，并不能“自然而然”地明白机床的设计思想。按照这种思想方法去做事，就必然导致“只见树木，不见森林”，也就必然导致各个局部之间的对抗、矛盾与冲突，使得整体功能不能正常地实现，以致整体崩溃和瓦解。这种情况在社会生活和管理实践中是屡见不鲜的。在这种时候，从功能上来看，还可以说“整体小于它的各部分之和”，即所谓内耗发挥了抵消作用。

确切地说，“整体大于它的各部分之和”这一论断，可以包含两种含义：一方面是新的质的产生，另一方面是某些功能或属性在量上的增加。关于这些，这里暂不深入讨论，只是强调整体观的重要性。

二、注重动态和过程的观点

演化或动态的观点，即认为宇宙或复杂系统的当前状态是长期演化的结果，只有把它作为一种进化过程的产物，才能理解和掌握它。

古代人类是从时间的概念引入这种演化观的。从长期的观察中，人类认识到世界并不是固定不变，即使是貌似永恒的星空，也在不断发生变化，涌现出新星和超新星。人类古代最重要的科学成就之一——天文和历法，正是基于这种科学态度的长期研究与观察的成果。古代的许多思想家基于这些成果，以各自不同的表达方式，把这种演化或进化的观点，溶入了自己所设想的世界图景。

《老子》第四十二章这样描述宇宙的进化过程：“道生一，一生二，二生三，三生万物。”类似的说法可以在许多不同民族的传说，以及不同宗教的经典中见到。相对地说，老子的叙述显然更自然一些，更少一点神秘和臆想的色彩。

演化观的反面则是静止的、僵化的观点。

完全否定变化和发展的观点与现实的距离太大，一般不会得到人们赞同。然而，这并不等于科学的演化观能够不战而胜，自动地为人们所接受。最常见的与科学的演化观相对立的，是循环论，即把发展和演化看做是一系列状态的循环与重复。这种观点虽然在表面上承认运动和变化，但是实质上否认了宇宙与复杂系统的真正的变革。这种观点把变化与发展仅限于日出日落、鸡生蛋蛋生鸡这种相对稳定下的重复和循环。在这种观点中，一万年前的宇宙和现在的

宇宙，现在的宇宙和一万年后的宇宙，也不会有什么本质的区别与变化。或者说，他们否认宇宙有真正的历史。所以，古代思想家能够根据当时有限的观察，提出演化或发展的观点，是很不简单的，这不能不说是一种正确的直觉或天才的预测。

三、注重质变的观点

虽然哲学家们早就提出了量变与质变的辩证关系的观点，指出了两者的相互联系和相互转化。然而，在近代科学中，只重数量和量变，而忽视质变和新的质的产生的倾向是十分普遍的。在相当多的场合，人们自觉或不自觉地把质的区别完全归结为量的差别，从而事实上否定了质的差别。

在这方面，数学和系统科学是不同的。如果说数学是研究量变的普遍规律，那么系统科学则是以研究质变的普遍规律为己任。

现代系统科学重新把系统演化的规律和机制作为研究的重点，研究“自组织”、“涌现”等质变现象，把人类对于宇宙演化的认识提高到一个新的水平。关于这方面的详细内容，本书后面的章节将做简单介绍，更详细的内容，读者可以阅读著名学者霍兰著的《隐秩序》和《涌现》两本书。

四、重视层次之间差别的观念

层次观，即认为宇宙及复杂系统都是分层次的，层次之间互相联系又互相区别，构成了整个宇宙或复杂系统。

围绕层次的问题，有两个重要思想需要强调。首先，层次之间的区别不只是量的区别，而是质的区别。用古代思想家的形象描述来形容，跨越层次需要经过“脱胎换骨”。上一个层次对下一个层次来说，都是无穷大。而每跨越一个层次（不论是向上，还是向下），都是一个新的大千世界。在这里，层次的概念蕴含着宇宙在质的方面是无限的这一重要思想。许多人虽然也用层次这个词，但是他们却往往把层次之间的差别仅仅看做是量的差别，换句话说，他们否认宇宙在质的方面的无限性，把层次的转变仅仅看做是量的变化。应该说，这不能算是科学的层次概念。注意，正是在这方面，近代科学和现代科学在思想方法上显示出根本性的分歧。

由此引出的第二个要点就是层次之间既有联系又有区别的辩证关系。不同层次之间的事物以及它们的性质之间是有相互联系的，但是这种联系并不是简单的汇总或统计的关系，而是有着各种特定的方式与途径。如果认为上一层次

的规律可以简单地归结为下一个层次，或者认为不同层次之间都服从于同样的、有限的几条规律，那就在事实上否认了层次之间质的差别，也就从根本上抹杀了层次。当然，要把这种辩证关系弄清楚，特别是结合各领域的具体情况，明了每个细节，绝不是容易的。不要说古代的思想家，即使今天的人类，也还远远没有达到这样的认识水平。

关于层次，还有许多问题需要人们去深入研究，这里只是初步地说明层次概念的重要性。

五、关注由活的主体组成的系统

注重由活的主体组成的系统的观念，即认为客观的复杂系统中，多种利益主体的存在是客观存在的基本事实。这种观点认为，许多系统的发展和演化，许多复杂行为和性质的出现都是由其内在的、各种不同类型的主体的相互作用所推动的，而不是外力所强加的。

许多传统的学科，比如经济学和管理学，是把社会系统看成和机器一样，个体只是死的、没有主动性的部件。在这种思想指导下形成的管理和控制方案，常常是领导者“一厢情愿”的最优化，在实际中经常是行不通的。现代系统科学则把多种具有主动性的主体的存在作为基本的事实，并且认为正是这些主体的适应性行为，以及它们的相互作用是系统发展演化的根本动力所在。

在近年来兴起的“基于主体的建模方法”（Agent Based Modeling，简称 ABM）或“多主体系统”（Multi-Agent System，简称 MAS）就是这种理念的具体体现。这种理念为认识和管理社会、经济、环境、生态等复杂系统提供了富有启发的思路。这种理念的集中表述可以在前面提到过的霍兰著的《隐秩序》、《涌现》两本书中读到。

六、对于不确定性的关注和研究

现代系统科学的理念与传统科学的另一重要区别在于对不确定性的理解。以牛顿力学为代表的近代科学，在用数学方法正确地表述物理规律的时候，有意无意地把科学性与确定性等同起来，而把不确定性作为非科学或伪科学的代名词。这种绝对化的观点在相当程度上阻碍了科学的进步，为回到宿命论的老路开了后门。

在这方面，关于混沌和分形的研究是一个典型的范例。20 世纪 60 年代以来，关于混沌现象的研究，打破了传统科学中把确定性和不确定性截然分割开

的思想障碍，以大量客观事实和实验表明，正是确定性和不确定性的相互联系和相互转化，构成了丰富多彩的大千世界，其中的许多现象与规律是无法在绝对排斥不确定性的旧思维框架中解释的。最诱人、最精细的生命现象，恰恰产生于混沌和有序的边缘。

作为描述有关混沌现象的数学工具，分形的研究也引起了广泛的关注，这不只是由于分形图案的神秘和美丽，更主要的是它预示着数学的重大变革。目前，关于混沌和分形的研究正在走向深入，走向各个实际应用部门。

事实上，关于不确定性的研究早已经在许多学科领域不约而同地开始进行，量子力学中的海森堡测不准原则、数理逻辑中的哥德尔定理、社会选择理论中的阿罗不可能定理，以及模糊逻辑等方法的提出，都从不同的角度为不确定性名正言顺地成为科学研究的对象，准备了条件。

正是在这样的背景条件下，现代系统科学把对于不确定性的研究作为一个重要的视角，从而为现实的复杂系统的理解和管理，提供了新的思路。这方面的典型就是西蒙的基于决策理论的管理学说，他的《管理决策新科学》一书，就简明地介绍了这一思想，正是这一新的理念使他荣获了诺贝尔经济学奖。

七、对于人为事物和做事方法的关注和研究

传统的科学基本上是研究自然的事物，即与人的意志与行动无关的客观事物的规律。然而，在我们实际的生活环境中，事物却并不是这样。我们周围的事物，从楼房、城市、交通线路、通信网络直到社会组织，无一不是人类的创造。这些人为的事物在许多方面与自然事物是有区别的。例如，他们都是按一定的目标设计出来的，是先有概念而后有具体的事物，等等。这种与人（包括个人和人类整体）的意志与行为有密切关系的事物，与自然事物有什么不同的规律呢？以前的科学基本上没有研究这个问题。还是西蒙，在他的《关于人为事物的科学》一书中提出了这个问题，并由此引申出一门新的学科——设计科学（Design Science）。目前，国外的许多大学已经设立了这样的专业。

我国著名系统科学专家许国志先生在 20 世纪 60 年代就提出了建立“事理学”的见解，他认为传统的科学只注意研究“物理”——客观物质的道理，却没有注意研究“事理”——人如何有效地做事的道理，而这种科学对于人类社会来说是同样重要的。后来，顾基发教授等专家学者进一步把这一思想发展成为“物理—事理—人理”的完整理论（简称 WSR 理论），得到了世界各国学者的重视与承认。顾基发教授还当选为世界系统科学大会的主席。

所以,关于人为事物和做事方法的研究也是系统科学的一个重要理念,注重人为事物和做事方法是现代科学不同于传统科学的重要区别之一。

以上这些思想和理念,是我们学习和研究现代系统科学时必须把握的。我们后面会介绍许多具体的技术、方法、操作规程,都是这些理念的具体体现。希望读者在学习时注意这两个方面的联系与呼应。缺乏具体实现手段的理念是没有实际意义的空谈,没有理念为基础的操作是盲目的模仿,只有这两者有机地结合起来,才是科学的真正的目的和价值之所在。

第三节 系统科学的研究方法与工具

上节所讲的这些理念,都需要通过具体的技术和方法来实现,否则就成了纯思辨的空谈。所以我们在学习和研究系统科学的时候,还需要细致地学习和掌握迄今为止人们落实这些理念的具体方法。在本节中将从以下6个方面讨论有关的方法和技术要点:建立多主体模型的研究方法;建立复杂网络模型的研究方法;基于海量数据的数据挖掘和分析方法;计算机模拟的应用;定量与定性相结合的研究方法;处理不确定性的研究方法。

一、建立多主体模型的研究方法

建立概念模型是科学研究的基本方法。但是传统的科学中建立的模型往往是单个主体的、用数学公式表达的模型。这些模型比较简单,和实际系统,特别是生态、社会、经济等复杂系统相比,过于简化,实际价值不大。

针对这种情况,现代系统科学基于多种利益主体的客观存在,从分析不同主体的价值取向和行为规律入手,建立起能够反映复杂的因果关系和演化过程的新模型,这就是ABM或MAS模型(基于主体的模型或多主体模型)。

这种方法已经在越来越多的领域中得到应用,正在吸引着越来越多技术人员的注意。本书第五章将提供来自多种不同领域的多主体模型,供读者参考。

从理念来说,多主体概念模型的理论基础是霍兰的复杂适应系统理论(Complex Adaptive System,简称CAS理论),即把组成复杂系统的、具有适应性和主动行为的主体作为研究的入口,研究和分析它们在不同的环境条件下的行为规律,并从微观到宏观,自底向上地找出整个系统演化 and 发展的机制和规律。

从实现技术上讲,这种方法依据的是计算机模拟技术和对策论的分析方法。关于计算机模拟,现在已经有了许多专用的软件和工具,如 Swarm, RePast, StarLogo, DYNAMO 等。本书的第四章将会从使用的角度进行简要介绍。有兴趣的读者可以参阅有关的专著和教材。对策论的分析方法,是 20 世纪的重要科学成就之一。对策论本身是一种严格的数学方法,它的要点在于把互相进行讨价还价的冲突双方的行为统一到一个数学模型中。这两个基础使多主体概念模型能够具体运行,并且得到有价值的实际结果。

这一方法是目前在系统科学应用中最为广泛、最能够得到直接效果的一个突破点。

二、建立复杂网络模型的研究方法

从网络的角度来看待复杂系统的思想由来已久。从具体的交通网络,到社会中的人际关系网络;从生态系统中的食物链到商业中的供应链;以致抽象的因果网络和概念网络,可以说,在各行各业和各种学科中,网络无所不在。所以对于系统科学来说,网络的概念实在是复杂性和系统概念的义中之理。系统就意味着若干部分组成的整体。各个部分以某种方式相互衔接、相互联系、相互配合,这就构成了新的事物,产生了新的质,这就是系统和它的丰富多彩的内涵。显然,在这里网络的基本内容已经浮现出来,这就是若干事物(结点)和它们之间的若干联系(边)。同样地,当我们讨论复杂性的时候,也十分自然地对于事物和事物之间的联系进行分析。无论是物理的、实际的连接,还是逻辑的、功能的协调,以及因果关系的交织,都可以用网络的形式加以描述和体现。

自古以来,人们就有了网络的概念,并且在各个领域中加入应用,特别是在系统科学和复杂性研究中,网络的概念与方法处处可见。例如,工程管理中的网络图分析法、系统动力学中的因果图和流程图、生物化学中的代谢网络、社会学中的人际关系网络等,都是十分明显的例子。特别值得提出的是,在这些现实网络的基础上,数学中已经形成了专门研究抽象网络的分支——图论。目前作为离散数学的重要组成部分的图论,对于一般的图,即由一些结点与连接它们的边组成的网络,进行了深入的分析,对于连通、遍历、覆盖等问题形成了一整套的概念和方法,得到了许多重要的成果与结论。例如,众所周知的旅行推销商问题(Travel Salesman Problem, TSP),它不但在理论上具有重要意义(它是典型的计算复杂性问题, NP 问题),而且在实践中也具有直接

的应用。可以说,到 20 世纪的中叶,人们对于网络的一般概念和观察的方法,已经形成了一套比较完整的理论,其主要表现形式就是图论,特别是关于随机网络的理论。随机网络理论的代表是 E—R 模型。这个模型最初是由 P. Erdos 和 A. Renyi 提出的。E—R 模型用数理统计的方法对于网络的拓扑结构进行研究,特别是连通性、树和环的出现等问题。例如,他们找到了连接概率的临界值,在这里一系列特性发生突变。在其后的 50 年中,E—R 模型成为学术界研究网络的基本思路 and 主要数学工具。

然而,以计算机和现代通信技术为主要代表的新技术革命在 20 世纪的后半叶席卷全球。这一场大变革不仅在经济、生产、管理、社会等各个领域深刻地改变了人类的生活,同时也使人们的思维方式以及对周围世界的认识发生了深刻的变化。在人类关于网络的认识方面有什么新的突破呢?最值得注意的就是小世界网络和无标度网络。

传统的网络理论是建立在静态观念的基础之上的。在 E—R 模型中,网络的状况一旦形成就不再变动,有关的分布则是在随机的基础上推演出来的。另一方面,与上一节所讲的主体观念相联系,在传统的网络中,结点没有任何主动的属性,而只是被动地、随机地进行规定的动作。这当然是和传统的系统观点有关的。这两个弱点使传统网络理论与现实状况产生了很大的差距。

互联网在人类对于复杂网络的认识方面发挥了特别的作用。作为人类社会前所未有的庞大网络,在短短的十几年中,互联网已经成为全社会刮目相看的新“媒体”、新“社区”、新“话语”。没有人能忽视它那巨大而深刻的影响。美国的 A. L. Barabasi 教授等人在对互联网进行观察的时候,发现这个庞大的网络并不遵循传统的随机网络理论所描述的规律,他们在 1999 年由此提出了无标度网络 (Scale Free Network) 的理论,开辟了复杂系统研究的新思路。类似地, Watt 等人提出的小世界网络的概念,也为我们研究和认识复杂系统提供了一系列新的思想。

近几年来,用新的网络方法研究复杂系统的研究成果不断涌现,内容涉及社会、生物、化学、生态、环境等许多领域,成为一个潮流。例如,用网络方法研究社会现象的社会网络分析 (SNA) 已经成为一个专门的议题,并且已经有专门的软件。所以我们将用网络分析复杂系统作为系统科学研究方法的第二个要点。

三、基于海量数据的数据挖掘和分析方法

数据挖掘 (Data Mining) 是目前在计算机界十分热门的一个话题。对于

复杂系统的研究，这也是一个值得注意的基本思路。从技术上讲，数据挖掘用到的不是一种技术，而是概括了帮助人们从海量数据中提取知识和规律的所有可能的技术，包括了数理统计、模糊信息处理、神经网络、分形算法，以及运筹学的许多内容。从目前的实际应用来看，最主要的仍然是统计方法。

数据挖掘的思想并不是新的，当人们收集了大量数据之后，如何从浩如烟海的数据的汪洋大海中找出规律性的东西，这历来是科学家们穷毕生之力所追求的目标。被传为科学美谈的开普勒和牛顿在第谷用毕生精力收集的数据的基础上，找出行星运动规律的故事，就是一个典型的数据挖掘的例子。那么，为什么近年来这个古老的议题又成为热门话题了呢？这里有两个背景条件：计算手段的进步和大量数据的积累。一方面，计算机技术的迅速发展和普及使得许多计算工作成为可能。有许多从数据中找规律的计算方法，如许多统计和运筹学的算法，虽然早已经被发现，但是由于计算量实在太太大，理论上可行的算法在实际中是很难进行的，因此不能得到实际的运用。计算机功能的迅速增长，使得这方面的障碍变得有希望突破了。这使得从大量数据中用计算的方法找出规律的希望再次炽烈起来。另一方面，几十年来计算机在社会实践和科学实验中的运用，已经积累了大批可以用来分析加工的数据，这些数据已经不是以K、M计算，而是用G、T来计算。简单地说，数据挖掘的“工具”和“原料”都已经具备了。这就是数据挖掘引起大家关注的原因和背景。

所以，我们今天在寻找复杂系统，包括自然系统和社会系统的规律的时候，无疑可以把数据挖掘的思路作为一个重要的方法加以考虑和利用。

四、计算机模拟——系统科学的研究平台

前面提到的三种方法实际上都需要基于计算机模拟。正如我们在前面已经引用的克里尔的名言“计算机是系统科学的实验室”。我们在研究系统科学和复杂性的时候，必须充分利用计算机这一不可缺少的重要工具。

现代系统科学的困难往往在于不能进行实际的实验。这不像研究物理学和化学。经济学方面，如果有人提出想提高利率，以使股票价格在两个星期内上升500点，以检验关于货币与股票价格波动的某个新理论，不难想象证券交易委员会将做出怎样的反应，更不用说全球性的金融共同体了。完全不可能做这类实验，因为这种系统的运作对日常生活过于重要，以至于不能以这种方式随意地摆弄。有些时候，比如核反应堆，因为过于危险，使得关于“何时核反应堆将熔毁”这样的实验不能进行，因为这种实验对实验人员是致命的。与之相类似，很多诸如文化、社会、生物等系统也很难做那种传统的自然科学意义上

的实验室实验。

怎么办呢？借助于计算机，我们可以进行模拟（或者叫做仿真 Simulation），我们现在可以对这类复杂系统进行可信赖的实验室实验研究。这里我们要说明，不是说计算机模拟是研究复杂性问题惟一可采用的方法，但它至少是在无法使用数学统计方法时，一种可能的解决方法。

计算机模拟用于复杂系统的研究，从 20 世纪 60 年代就开始了。不过在早期的计算机模拟中，计算机只是把一组不同的方程式整合在一起，基本上是数学方程（包括代数方程和微分方程）的体现。而在基于主体的计算机模拟中，运行着的是陷入相互作用和偶然事件之网的一个个主体，这些主体会犯错误，能够吸取经验教训，它们有自己的过去和未来，他们之间有复杂的相互影响和作用。更重要的是，整个宏观系统的发展和演化正是立足于这些主体和它们之间的相互作用的基础上。

目前，专门用于支持复杂系统研究的软件已经有许多，建立专门的现代系统科学实验室已经具备条件。本书的第四章将对有关的软件技术和产品进行专门的介绍。

五、定量与定性相结合

关于系统科学的研究方法，有一个问题值得特别注意，就是定量和定性的关系问题。目前在科学界和社会上比较普遍存在的一种看法是把科学和定量等同起来，从而忽视了定性分析的必要性和重要性。这正是系统科学所要纠正的传统观念之一。

从理论上讲，马克思主义早已把质和量两个范畴的对立统一作为基本的原则加以明确。量变与质变作为客观世界发展变化的两种基本形式，相互联系、相互转化，造就了丰富多彩的大千世界。一定的质必须体现为某种量，而任何量都立足于某种质的规定之上，二者的辩证关系是十分清楚的。

然而，传统的科学却在相当程度上忽略了质的差别，片面地把量的变化作为世界的基本的、甚至是惟一的变化形式。有的人试图把一切质的差别归结为量的差别，从而从根本上否定了质变。我们不妨回顾一下人们在接受相对论和量子力学时所经历的困惑。忽视世界在质的方面的多样性，试图用某一特定条件下的量变规律去解释和理解所有层次的现象，这就必然导致冲突和迷茫。其实，恩格斯早就批判过这种试图建立“终极理论”的思想。只不过科学界是在 100 多年后，经历了许多实际教训后才逐步地接受这种关于世界的质的多样性（或无限性）的辩证思想。

简单地说, 质的多样性和无限性、质的差别不能完全归结为量的差别, 这是辩证法的基本常识。从思维方法上讲, 把一个或几个定量指标绝对化, 显然是一种形而上学的观念, 与辩证法是格格不入的。例如, 目前关于 GDP 作用的讨论, 问题并不是出在 GDP 是否正确反映了客观情况。GDP 无疑能在一定程度上反映发展水平, 但绝不是全部, 在这一点上, 其他任何指标也是一样的。问题在于不应该把定量指标绝对化。

必须再次申明, 我们绝无否定定量指标作用的意思。任何质总要表现为一定的量, 这是毫无疑义的, 这也是辩证法的基本常识。在许多情况下, 从没有定量指标到找到一个比较合理的定量指标或指标体系, 往往是一个巨大的进步。问题是要记住它的应用范围和时限, 记住它是相对于一定的条件和时期才有意义的。一句话, 实事求是、具体问题具体分析永远是辩证法的灵魂。

例如, 在工业化进程中的—定阶段, 钢铁产量曾经是国家实力的标志, 这是完全合理的、必要的。类似地, 石油产量、机床数量、战舰吨位都曾在一定的条件下被当作国家实力的标志。这些都是有当时当地合理性的。然而, 当情况发生变化, 环境和条件改变之后, 当社会进入一个新的发展阶段时, 这些指标就完全可能不再成为标志, 而需要寻找别的标志。这里有两点是必须反复强调的。首先, 客观事物是无穷的, 任何指标, 哪怕是 GDP 这样的综合指标, 只能反映无穷方面中有限的几个方面。正像一个人的血压或肝功能指标只能反映其身体状况的若干方面, 而不能笼统地根据一个或几个指标得出此人是否健康的全面结论。各种所谓综合指数, 在其成分的取舍和权重的确定中, 已经包含了大量的主观因素, 以致有些情况下简直不知所云, 不知它表示什么。另一个问题是时间和阶段的变化带来的影响。电视机的普及率曾经被当作人民生活水平提高的标志, 但当电视机已经接近饱和时, 这个指标还有什么意义呢? 20 世纪 60 年代的三大件和今天的三大件已经完全不同, 这难道不是非常自然的事情吗?

所以, 系统科学认为定量方法是必要的、有用的、非常重要的, 但是, 决不能倒过来说, 只要定量的就是科学的, 只要有了数字就是科学决策或科学管理。正因为这样, 钱学森先生曾多次强调定量与定性的结合, 这才是更高的境界, 这是非常重要的。这正表明不能绝对化地、片面地追求定量化, 更不应该形成“只要定量的就是科学决策或科学管理”的偏见。不难看到, 这种偏见在社会上相当普遍地存在着的。

在这方面, 系统科学提供了许多定量分析和定性分析有机地结合起来的思

路和方法，值得我们注意和参考。最常用的方法是在统计资料分析中的定性判断的方法，例如各种估计理论和假设检验。在这方面读者可以参考任何一本数理统计方面的教材。反之，对于定性资料，也有不少统计方法可以进行定量的加工和处理，例如，张尧庭教授的《定性资料的统计分析》一书。从方法的角度看，层次分析法、德尔菲方法等也都是在实际工作中常用的、把定性和定量结合起来的有効方法。还需要提出的是，即使在非常理论化的数学中，也在不少领域中提出了定性的研究思想，如拓扑学、动力系统的理论等。

总之，对于系统科学来说，定量与定性的有机结合不但是一个基本的理念，而且要具体地落实到一系列可操作的方法中。这是学习者必须牢记的一个要点。

六、关于不确定性的处理

在关于系统科学方法讨论的结尾，还需要对不确定性的处理专门进行一些说明。

前面已经提到，重新认识到不确定性的客观存在及其意义，是现代科学思想的一个重要进步，是现代系统科学的基本理念之一。所以在系统科学的研究工作中，对于不确定性如何加以考虑是一个必须回答的、十分重要的技术问题。

一般地说，人们首先想到的是数理统计。这无疑是有道理的。概率论作为研究随机现象的、历史最悠久的数学分支为人们提供了相当完整的理论与方法。对于这方面没有必要再加以强调了，况且现在的许多学科（包括理工学科和许多经济管理类的学科）已经把概率论和数理统计作为基础课列入教学计划了。

我们需要说明的是，数理统计并不是处理不确定性的惟一方法，我们的视野需要放得更宽一些。随着现代科学的发展，人类对于不确定性的丰富多彩的内涵有了更多的了解。在此基础上，许多新的概念和方法涌现出来，为我们提供了更大的选择空间。例如，模糊集合和模糊逻辑、粗糙集合（Rough Set）、遗传算法等。

许多计算机模拟软件或平台都提供了处理不确定性的功能，如产生各种分布的随机数等。当然，要用好这些功能，关键是根据具体情况选择适当的算法。不确定性是一个十分宽泛、复杂的概念，情况千差万别。所以，准备多种方法是非常必要的。

以上几方面问题是我们在进行系统科学的研究和学习时应当加以注意的。

第四节 学习系统科学的目的和方法

根据前面几节简单的介绍,读者已经可以看到,现代系统科学是一个十分丰富多彩的科学领域,它不但在开拓创新精神、深化理论研究方面具有深远的意义,而且对于科学研究和社会实际具有直接的应用价值。所以,作为一门方法论性质的课程,系统科学对于许多专业的学生是有必要学习的。本节将介绍这门学科的现状,以及为什么要学习这门课。

一、系统科学的研究现状和发展方向

关于系统科学和复杂性研究的现状,目前有许多不同的学派和不同的介绍角度,众说纷纭。所以读者常常可以看到许多同样冠以“系统科学”或“复杂性研究”的机构、刊物、专著、会议,在讨论着相去甚远的议题,介绍着完全不同的理论和方法。作为一个新兴的领域,各种概念还在形成之中,百花齐放、百家争鸣的局面不仅是必然的,也是有益的。然而,这也给学习者带来一些困难,为了便于读者掌握全貌,这里以当今国际学术界的两个重要研究机构——办公地点设在欧洲的国际应用系统分析研究所(International Institute of Applied System Analysis,简称IIASA)和地处美国的圣菲研究所(Santa Fe Institute,简称SFI)为例向读者做概括性的、感性的介绍。以便读者对于这个学科的现状和发展方向有所了解,从而形成基本的轮廓。

(一) 国际应用系统分析研究所

国际应用系统分析研究所设立在奥地利,位于维也纳附近。它的起源可以追溯到20世纪60年代末。当时美国和前苏联两国关系开始解冻,为了打破冷战期间学术界的隔离状态,两国试图建立一个科学家交流与合作的渠道,组织科学家交流和研究人类共同面对的重大问题。在这样的方针指导下,70年代中期,开始了第一批东西方学者合作的项目,如环境问题、人口问题、荒漠化问题等,参加的学者也从开始设想的美国、俄罗斯两国扩大到了世界各国的学者。

作为联合国的一个研究和咨询机构,国际应用系统分析研究所开展了大量与全人类密切相关的重大研究课题,为许多国际会议及重要文件的准备提供了科学的依据。

国际应用系统分析研究所的研究工作具有两个突出的特点：跨学科性和实用性。该所的许多文件和网站一再强调这样一个观点：人类社会越来越成为一个整体，当今世界的紧迫课题，没有一个可以靠单独某一个领域的专家解决，所以必须以问题为导引，发挥综合和合作优势，从全局出发，妥善解决这些与国计民生紧密相关的议题。在实用性方面，国际应用系统分析研究所的课题都是从实际中来的，都具有直接的社会意义和经济意义。在这方面，国际应用系统分析研究所实在堪称把科学技术转化为现实生产力的典范。

还有一点值得注意的是，国际应用系统分析研究所非常注意引导青年科学工作者超越学科分割的制约，开阔眼界，从事跨学科的综合研究。例如，他们从1977年以来，每年都举行为期3个月的青年科学家研究项目，资助各国的青年科学家集中研究重大的、跨学科的现实研究项目。例如，2005年的研究计划，接纳了来自28个国家的60多名青年科学家。至今，陆续受益于这一计划的青年科学家已经超过1200人。

国际应用系统分析研究所和我国有着长期的、多渠道的合作与联系。中国科学院和许多大学也和该所有着长期的合作与交流。早在20世纪80年代，该所就和我国学者一起开展了有关宏观经济管理的决策支持系统的研究和开发，产生了很大的影响。不久前，近年来参加上述青年科学家项目的我国学者还在北京召开了报告会，介绍了他们的收获和体会。

（二）圣菲研究所

圣菲研究所成立于1984年。它是一个独立的、非营利的研究所，靠申请各种基金来支持跨学科的研究工作。它是全美国最优秀的五个研究所之一，与具有上百年历史的贝尔实验室等并列。

圣菲研究所的发起者，第一任所长乔治·考温（George Cowan）是一位具有广阔视野和远见卓识的科学家。他曾长期担任洛斯阿拉莫斯（美国核武器研究基地）的技术与组织工作，具有丰富的理论知识和实践经验。当他退休时，多年的思考促使他萌发了这样一个创意：建立一个冲破学科界限的、独立的研究所，探讨各学科共同关心的难题——“人类究竟是如何认识和处理复杂性的”。这个想法的出现不是偶然的。考温在几十年的科学生涯中，深深体会到近代科学中片面强调还原论思想的弊病，如学科分隔造成的隔膜，综合整体观念的缺乏，只见树木不见树林的短视和偏见，在丰富的实践面前的僵化和无能。他认为，这些弊病不仅阻碍了科学的发展，而且往往是人类面临的许多现实问题难以得到有效解决的原因所在。因此，他利用自己多年工作中建立的、在科学界的广泛联系，把这种想法广为宣传。

在许多著名科学家的支持下，第一次研讨会于 1984 年，在美国新墨西哥城的首府圣菲市举行。这次会议以经济为主题，参加者不但有以诺贝尔经济学奖得主肯尼思·阿罗（Kenneth Arrow）为首的许多经济学家，而且有许多物理学家，包括诺贝尔物理学奖得主马瑞·盖尔曼（Murray Gell-Mann）和菲利普·安德森（Philip W. Anderson）。这次成功的交流使得与会者十分兴奋，并且一致同意按此方向走下去。这就是圣菲研究所的诞生。考温很自然地被推选为第一任所长。

以复杂性为研究的中心议题，是圣菲研究所的一大特色。在 80 年代中期，虽然已有不少学者提出并开始研究复杂性，但是还没有专门的机构从事这方面的工作。其主要原因之一是近代科学长期形成的学科分隔的局面，阻碍了科学家们的相互了解和交流。所谓隔行如隔山的情况越来越成为科学进步的障碍。资金分配、成果认定以及学术圈子的划定，都使得跨学科的研究工作举步维艰。一种冲破学科偏见的、和谐的合作氛围，一个不受各种传统体制束缚的交流场所，一套鼓励创新的运行机制，成为许多希望科学进步的学者所追求的理想。圣菲研究所的出现使人们见到了希望。

很快，圣菲研究所就吸引了一大批富有创新精神的，勇于探索这个新开辟领域的科学家。他们来自许多不同的传统学科。如，经济学家布赖恩·阿瑟（W. Brian Arthur），他在经济学界首先研究了现代经济的重要特征——收益递增现象；计算机科学家约翰·霍兰（John H. Holland），他是遗传算法（Genetic Algorithm）的首创者，本书的讨论议题——复杂适应系统（CAS）理论也是主要由他提出的；还有以研究“人工生命”闻名的克里斯·朗顿（Chris Longdon），从医学领域来的斯图亚特·考夫曼（Stuart Kauffman），有复杂性研究多种早期著作的作者约翰·卡斯蒂（John Casti）等。这些学者来自不同的大学、不同的研究机构，甚至不同的国家。他们中既有德高望重的诺贝尔奖得主（如阿罗、盖尔曼、安德森），也有初出茅庐、血气方刚的青年学者（如朗顿，他当时还正在攻读博士学位）。在圣菲，年龄、专业、地位都已不再构成交流的障碍，所有人都为了创建一门新的学科而到这里来。这里不授学位，更没有终身职位，但是却具有如此巨大的吸引力。到 80 年代末期，圣菲研究所已经成为复杂性研究的众所周知的中心。关于这一段历史，读者可以从米歇尔·沃尔德鲁普所写的《复杂》一书中读到生动的描述。

进入 90 年代以后，圣菲研究所的工作进一步深入。首先，该研究所从 1994 年开始举办乌兰讲座。这是一个一年一度的讲座，用以展示复杂性研究所最新成果。另一件影响深远的事情是，公用的、为复杂系统建立模型而设计

的软件平台 Swarm 的开发和推广。(关于 Swarm 的详细情况,本书后面将用专门的一章来介绍。)

圣菲研究所非常重视人才培养,它把扩散和普及系统科学的思想作为自己最重要的任务之一,尤其是向下一代科学家的宣传与普及。它的夏季学校(Summer School)是一项非常具有特色的活动,到2005年,已经举办了12期。这种夏季学校每年暑假举办一次,为期四周,讲课的教授都是在系统科学方面最具权威、最有创新的著名专家,而对象则是研究生以及本科生。参加者不但能够直接聆听最权威的专家讲课,而且通过做项目和写论文,直接参与科学研究。他们的目标很明确:培养面向21世纪的新一代的科学家。在这里,我们可以看到21世纪的、全新的现代科学的雏形。

此外,圣菲研究所还出版了许多出版物,除了已出版的几十种专著外,它还出版杂志《复杂性》(Complexity)。为了加快交流,圣菲研究所还编发了内部交流的工作论文(Working Papers),每年有100篇左右,不但印成单份散发,而且还放在网站上。这一措施大大加速了该领域的交流。

作为一个新兴的交叉学科,系统科学在传统的学科体系中常常不易得到发展的空间,有时甚至不得不要为生存而斗争。圣菲研究所的创新之处就在于它为系统科学的发展创造了一个良好的环境,提供了发展的条件。

还需要说明的一点是,圣菲研究所十分重视理论与实际的有机结合。从性质上来说,圣菲研究所是以基础理论研究为主的、非营利的研究机构,各种基金会的支持也往往不与直接的经济效益挂钩。然而,千万不要因此而形成一种误解,以为圣菲研究所的工作只是象牙塔中的计算游戏。事实上,圣菲研究所的研究课题几乎都有十分现实的背景,并与重要的现实问题相联系。人数最多的课题组是经济课题,这显然是与近20年来世界经济体系的深刻变革相联系的。此外,关于免疫系统的研究,关于生态与环境系统的研究,关于社会变迁的研究,关于生命起源的研究,都和当今人类的许多迫切的、现实的问题相联系。通过开放的,灵活的各种方式,圣菲研究所和世界许多大学、研究机构以及企业建立了广泛的联系和合作,这使得它与整个人类社会的发展与进步息息相关,确实做到了理论联系实际。

通过以上的简单介绍,读者已经可以看到,系统科学和复杂性研究在现代科学领域中确实是一个非常重要、非常活跃、具有特殊地位的分支,值得从事科学研究和实际工作的人们关注。这两个单位的工作内容非常丰富,有兴趣的读者可以从他们的网站得到更多更新的信息。

二、为什么需要学习系统科学

经常会遇到这样的问题：“我从事的是具体的技术或管理专业，为什么需要学习这样抽象的系统理论呢？”事实上，这种疑虑正是系统科学需要学习的理由。简单地说，学习系统科学就是我们经常说的，学习分析问题和解决问题的能力。我们未来的科学研究人员、管理者和劳动者需要怎样的分析问题和解决问题，究竟通过怎样的学习才能有效地培养起分析问题和解决问题的能力？

在近代科学的长期熏陶下，人们往往只是把具体的技术和具体的领域知识当做实在的本领，而忽略了做事情、想问题的普遍方法，忽略了系统化的、协调的理念和方法。一种潜在的观念是，只要各部分细节做好了，全局自然而然地就能够顺利达到预期的目的了。从思想方法上说，这就是还原论的观念。简单地说，学习系统科学就是为了从根本上纠正片面强调还原论的偏颇，树立更加科学、更加符合实际的做事方法，实现思维方式的根本转变，把我们的干部和全体人民的思维能力提高到更高的、更加科学的水平。

所谓还原论是指这样一种观点：对于任何事物，特别是复杂事物的认识和理解，可以通过对它的组成部分的认识和理解去实现，因而复杂事物、复杂系统的演化规律，可以从它的各个部分的运动规律中推导出来。

作为认识复杂事物的一种方法，还原论，即分解或分而治之的方法无疑是一种必不可少的、在许多情况下行之有效的办法。解剖学帮助人们认识了动物体以及人体的详细构造与各种器官的功能；对于原子结构的认识使化学建立在全新的、更为坚实的基础上；正是在成百上千年的观测基础上，从一个又一个恒星、行星以及彗星的运动轨迹中，天文学才逐步形成了它的理论体系。分解方法的成功案例不胜枚举。我们今天享受着的物质文明与精神文明，正是建筑在许多这样的研究成果与发明之上的。

然而，关键在于，分解或者还原并不是足以保证人们完全地认识世界和成功地做事的充分条件。如果因为还原方法的一系列成功，而把它的作用片面地、无限地夸大，甚至认为它是人类惟一的认识方法，那么过去的成功就将成为进步的障碍和桎梏。显然，这种思想与我们所说的系统观是对立的。

分解方法本身无疑是有效的。问题在于不应该把它绝对化、僵化，以致认为只要靠它，就能完全解决所有的科学与认识问题。或者反过来说，以为整体的一切性质都可以归结为它的各部分的性质，即：不承认各部分组成整体时，增添了新的内容、新的质。这种观点就是我们所说的片面强调还原论的观点。

说到部分怎样组成全局，传统的科学往往仅限于量的积累和计算。因此，

人们曾经以为只要有了计算方法和足够的计算能力，全局的所有性质和行为都可以从局部的属性（通过数学运算）中推演出来。在计算机产生时，许多人曾经兴奋不已，认为计算机的能力足以解决任何庞大烦琐的计算问题，只要有了算法，剩下的只是计算时间的长短问题而已，似乎只要计算机的速度不断提高，就没有克服不了的障碍。这样一来，所有事情只剩下寻求算法的问题了，只要找到了算法，其余的一切都可以留给计算机去做。世上所有问题就都可以用计算机一劳永逸地解决，关于质的差别的思考就没有存在的价值和必要了。然而，好景不长，NP问题的提出、计算复杂性理论的研究进展，使人们不得不放弃了这种过于乐观的想法，回到较为实际的、承认质变的客观存在的观点上来。所谓计算复杂性理论，简单地说，就是人们对于计算问题所需要的时间或工作量的深入分析和认识。人们看到，事情并不像想的那么简单。一些似乎很简单的计算问题，却面临极其巨大的计算量，在现有的，以及今天可以想象的任何计算机上都无法实际运行。例如，著名的旅行推销商问题、棋类游戏等。这就给否认质变、把一切归于量变的观点以沉重的打击，这也从一个方面促进了上述思想变化的过程。

总之，许多事实已经一次又一次地证明，现代社会和现代科学迫切需要人们超越分工带来的“隔行如隔山”的状态，迫切需要新一代的科学家、管理者、劳动者从总体上、从做事情想问题的方法上超越前人，达到一个新的文化高度。人类的文化是一个整体，人们常说，“隔行不隔理”，在信息时代我们已经有可能实现这样一种理想的境界。在这个科学观念更新的关键时期，系统科学正扮演着一个重要的角色。这就是我们认为各行各业的人们都需要学习和研究现代系统科学的根本原因。

当然，对于不同的专业，学习和研究系统科学的重点和深度必然会有所不同，也应当有不同的要求，这需要逐个专业认真研究。但是，在需要学习和研究的信息时代，做事情和想问题的方法应该是没有例外的。

三、如何学习系统科学

由于系统科学的特点，这门学科的学习及讲授方法，不可避免地与一般的课程会有很大的区别。我们的经验是，只有突出以下三个特点，才能获得实在的收获。

第一点是突出理念和方法，切实把研究问题和做事情的方法作为需要学习的基本内容。这门课必须是学习认识和行动的思路，而不是僵死的教条。如果只限于背诵一些条条，是毫无用处的。学习的时候不妨回顾自己以前学习或工

作的经验教训，找出传统的观念在自己头脑中的影响，从自己的实际经历中得到切实的、生动的经验。这才能得到真正的收获。

第二点是一定要结合自己实际从事的学科和专业领域。脱离实际工作，系统科学就很容易泛化成为空谈。这种情况现在社会上很普遍。一些人遇到了困难，顺口就讲一句“这是一个复杂的系统工程”，这种贴标签式的空谈没有任何作用，只能败坏系统科学的声誉。我们提倡学习和运用系统科学，必须有具体的专业作为实际的应用领域，而不是泛泛的空谈。

第三点是充分利用计算机和数学作为工具。这是系统科学的实践作用得以落实的保证。另一方面，现代社会的大量复杂的实际问题，正是计算机和数学的广阔的用武之地。系统科学的理念和现代信息技术（包括在计算机基础上实现的数学、运筹学、数理统计的算法）的结合，正是当今科学技术的前沿，也正是科学转化为现实生产力的突破点。现代信息技术在社会经济中的作用大家已经深有体会，但是对于科学来说，这种作用还远远没有充分发挥出来，有必要在这里再次加以强调。

四、本书的结构和安排

本书是一门系统科学概论课的教材，是对现代系统科学进行入门性的介绍，而不是对现代系统科学的完整讲述。而且，本课程的两个基本特点也使本书不同于一般的教材，这就是它的方法论特性和正在形成中的新学科的特殊情况。读者需要的是，结合自己专业的具体情况，发挥自己的主动性和创新性，真正提高自己分析问题、研究问题的能力，而不是记忆或死背一些现成的结论或条条。

根据这样的特点，我们把本书分为五章，具体安排如下。

本章，即第一章，是本书的导言，目的是进行入门介绍，初步建立起基本的理念和框架。

第二章介绍现代系统科学的由来和产生，从历史回顾的角度，建立起对于系统科学的了解。黑格尔曾认为，从历史的角度对一门科学进行了解是一种好办法。我们希望系统科学史的简要介绍，将能够沿着时间的脉络，引导读者进入现代系统科学的殿堂。

第三章则从研究方法和领域的角度，从横断面介绍目前学术界研究的若干主要领域。这部分涉及的领域很多，有的难度比较大。读者并不需要深入所有的细节，而是根据自己的专业需要，选择有兴趣的了解其理念和方法，吸取有益的启发。对于比较难的段落，我们会给予说明，并指出如果要深入了解，需

要准备的知识和相关的资料来源。

第四章介绍用计算机进行复杂性研究的方法和思路，技术性比较强，需要有关计算机模拟的基础知识。我们以 Swarm 为例，为准备进行系统科学研究的读者提供比较具体的介绍。

第五章主要是通过实例来阐述系统科学研究工作的一般思路和方法。系统科学是新的、方法论性质的学科，所以最好的方法是通过例子体会。当然，各领域的例子具有极不相同的背景和特殊性，是否能够从中体会出一般的启发，肯定是仁者见仁、智者见智，没有必要要求一致。我们只是提供给读者一些参考材料供选择。

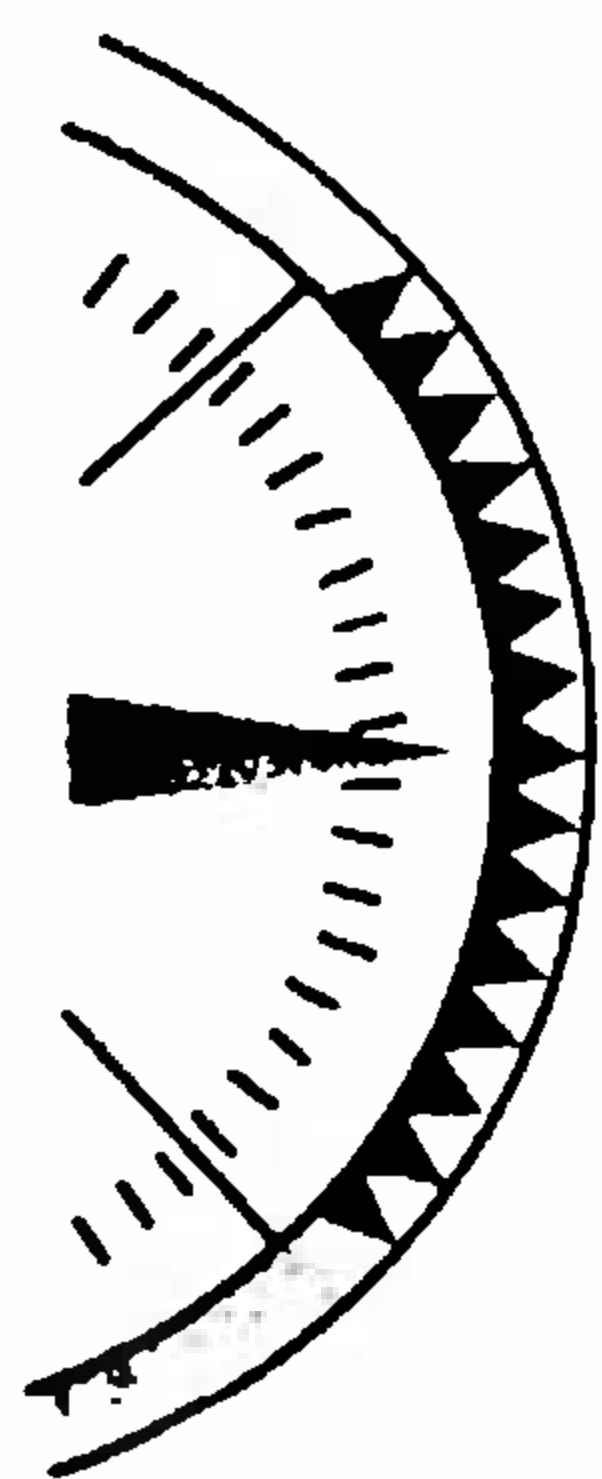
我们希望本书能够对系统科学有兴趣的读者有所帮助。

关键词

系统科学 复杂性研究 系统科学的理念 整体观念 演化观念
层次观念 不确定性 多主体系统 关于人为事物的科学 系统科学的研究方法
系统科学学习的目的和方法 国际应用系统工程研究所
圣菲研究所

思考题

1. 什么是系统科学？它在现代社会中具有什么意义与作用？
2. 整体观念的意义与重要性是什么？请举例说明。
3. 层次观念的意义与重要性是什么？请举例说明。
4. 动态观念的意义与重要性是什么？请举例说明。
5. 主体观念的意义与重要性是什么？请举例说明。
6. 不确定性在现代科学中的地位和作用？请举例说明。
7. 系统科学的研究方法有什么特点？
8. 简述多主体建模方法的要点和实现方法。
9. 简述复杂网络模型方法的要点和实现方法。
10. 简述数据挖掘的基本思想和实施方法。
11. 计算机模拟在系统科学中起什么作用？
12. 为什么要强调定量和定性相结合？
13. 为什么现代科学工作者和管理人员有必要学习系统科学？



第二章

系统思维的由来

内容提要

关于系统思维的起源，可以追溯到 2 000 多年前的中外古代思想家。尽管受生产力水平的限制，他们的思想往往表现为天才的猜测，其智慧的光辉至今仍令人折服。以培根、牛顿为代表所创立的近代科学，为许多关键性的技术手段提供了理论基础，在 300 多年中，创造了人类社会前所未有的文明和繁荣。近代科学对于人类文明的巨大贡献是毫无疑义的。然而，由于历史和社会条件的限制，近代科学的思想和方法不可避免地带有时代的局限性。就对系统和复杂性的认识而言，近代科学在强调分析方法的时候，在相当程度上忽视了整体、动态、层次、演化等重要思想和概念，过分强调了还原论。随着生产力的不断发展，这种片面的思想观越来越不能适应科学与社会发展的实际需要。现代系统科学正是在对于这种现象的反思中诞生和成长起来的。近几十年来，系统科学家们从不同的角度突破了近代科学以片面强调还原论为主要特征的思维框架，提出了许多新的观念、理论和方法。在所有这些工作的基础上，现代意义下的系统科学正在逐步形成自己的新的思想体系和思维方法。

第一节 古代系统思维的萌芽

一、古代系统思维的萌芽

古代人类就已对系统问题进行过认真的思考。几乎所有的古代思想家，都对宇宙的本原、事物的形成、层次的划分等问题进行过研究，并给出了各自的答案。例如，中国古代关于盘古开天辟地^①的传说，事实上就是我们的祖先关于宇宙形成过程的猜测。如果我们剥掉神话的外衣，不难看出这个传说实际上是表达了这样一些思想：

——宇宙的形成是一个由简单到复杂的发展过程；

——宇宙发展的总趋势是由简单、对称、无差别，走向复杂、非对称、分化，从而形成复杂的、多样化的大千世界；

——宇宙万物是相互作用、相互联系的，它是一个不可分割的整体。

类似的典型例子在中国思想史上还可以举出许多。例如，《老子》第四十二章中所说的“道生一，一生二，二生三，三生万物。”就表达了一种由简单到复杂的发展观。又如，屈原的《天问》以及后来柳宗元的《天对》，其中的许多表述也都涉及了系统、演化、发展以及复杂性的许多问题。

在欧洲，关于宇宙与人类起源的传说往往与《圣经》联系在一起。而不带宗教色彩，比较明确地表达系统思想的数是亚里士多德的“总体大于它的各部分之和”的著名论断。今天几乎所有论及系统思想的书籍和文献都要提到这一点。事实上，除了亚里士多德之外，欧洲许多古代思想家也有类似的论述，如卢克莱茨的《物性论》等。

总之，无论东方还是西方，古代思想家们关于系统思想的论述是非常丰富的，有待今天的人们去研究和开发。

^① 天地浑沌如鸡子，盘古生在其中。万八千岁，天地开辟，阳清为天，阴浊为地。盘古在其中，一日九变。神于天，圣于地。天日高一丈，地日厚一丈，盘古日长一丈！如此万八千岁。天数极高，地数极深，盘古极长。故天去地九万里。后乃有三皇。

天气蒙鸿，萌芽兹始，遂分天地，肇立乾坤，启阴感阳，分布元气，乃孕中和，是为人也。首生盘古。垂死化身。气成风云。声为雷霆。左眼为日。右眼为月。四肢五体为四极五岳。血液为江河。筋脉为地里。肌肉为田土。发为星辰。皮肤为草木。齿骨为金石。精髓为珠玉。汗流为雨泽。身之诸虫。因风所感。化为黎甿。

——徐整《三五历纪》《五运历年纪》

二、代表人物

(一) 亚里士多德

亚里士多德（公元前 384 年—公元前 322 年，如图2—1），古希腊哲学家、逻辑学家、科学家。他总结了古希腊哲学发展的成果，首次将哲学和其他科学区别开来，开创了逻辑学、伦理学、政治学和生物学等学科的独立研究。他的学术思想对西方文化的发展产生了巨大的影响。



图 2—1

亚里士多德的著作分为两大类：第一类是他生前公开发表供一般人阅读的，用的是对话体。这类著作大部分都已失散，只有一些片断流传到现在。这类作品文体典雅，想象丰富，其中重要的有《论灵魂》、《论正义》和《论哲学》等。第二类作品朴素无华，推论严谨，大概是亚里士多德的讲授提纲、研究札记或学生的听讲笔记，一部分保存下来了。

亚里士多德有关系统的著名论断“总体大于它的各部分之和”，是古代系统思想的代表。除此之外，在他的很多论著中，都或多或少地包含了系统的思想观。例如，亚里士多德对宇宙的认识，是建立在地球中心说之上的系统观。以不动的地球为中心，在地球之外包围着数 10 层的球形天宇。这种早期的宇宙观，体现了他在认识宇宙系统时朴素的层次观念。

(二) 卢克莱修

卢克莱修（公元前 99 年—公元前 55 年，如图2—2），古罗马哲学家。他继承古代原子学说，特别是阐述并发展了伊壁鸠鲁的哲学观点。认为物质的存在是永恒的，提出了“无物能由无中生，无物能归于无”的唯物主义观点。反对神创论，认为宇宙是无限的，有其自然发展的过程，人们只要懂得了自然现象发生的真正原因，宗教偏见便可消失。承认世界的可知性，认为感觉是事物流射出来的影像作用于人的感官的结果，是一切认识的基础和来源，驳斥了怀疑论。认为幸福在于摆脱对神和死亡的恐惧，得到精神的安宁和心情的恬静。著



图 2—2

有哲学长诗《物性论》。《物性论》体现了作者世界观中系统思维的光辉。它的主题是古代的唯物论哲学，以原子论为核心，共分六卷。第一二卷论原子和虚空，即物质可分，但非无限可分，最后必由不可再分的基本粒子组成。第三卷论精神与灵魂，即精神和灵魂也是物质现象，由微原子组成，“死”只不过是这种原子的分解离散，“地狱”只不过是现世痛苦幻化而成的寓言。第四卷论知觉与性爱，第五卷论宇宙起源和人，第六卷论天文自然奇观及疾病。

(三) 老子

老子（公元前 571—公元前 471 年，如图 2—3），姓李，名耳，字伯阳，谥曰聃，楚国苦县（今鹿邑县）人，我国古代伟大的思想家，他所撰述的《道德经》开创了我国古代哲学思想的先河，对后世产生了深远的影响。

《道德经》，也称《老子》，是道家学派的经典之作。在《道德经》中，老子运用古代朴素的唯物主义辩证法的思想，来解释宇宙万物的生成、发展及其演化规律。《道德经》宣扬的是一种自然无为的天道观和无神论。其唯物主义体系的核心是“道”，老子反对天道有知，提出了天道无为的思想。

老子的思想中包含了早期朴素的系统观念。比如，老子说：“道生一，一生二，二生三，三生万物。”这是他对宇宙这个大系统的理解。从这样一个观点出发，他对于宇宙万物的相互关系及相互转化提出了一系列的看法，形成至今还为人们广泛研究的思想体系。又如，老子说：“大曰逝，逝曰远，远曰返。”他的这段话体现了系统规模与模糊性的关系。系统规模越大，越不容易看清楚它的本质，于是人们尝试着从远处来进行观察，久而久之，发现很多规律从远处还是无法辨明，于是人们再次返回了系统内部。

(四) 庄子

庄子（公元前 369 年—公元前 286 年，如图 2—4），原名庄周，战国时期宋国蒙（今河南商丘县东北）人。庄子是继老子之后我国道家学派的一个重要人物，后人往往把老子和庄子的学说并称为“老庄哲学”。

庄子在哲学思想及人生观方面，继承了老子虚无、无为的哲学观点，但比老子更激进，甚至认为“有为不



图 2—3



图 2—4

如无为”，“有用不如无用”。庄子继承和发挥了老子“天道自然论”的观点，但是在对“道”的解释上，庄子是唯心的。在精神方面，庄子进一步发挥老子“长生久视”的观点，认为“气”是人的根本。在文学方面，庄子是一位浪漫主义的文学家。他的文章以散文为主，具有想象丰富、气势磅礴、说理透彻、耐人回味的特点，为后世留下了许多脍炙人口的名言警句。他的著作《庄子》分内外篇，共有 53 篇，现仅存 33 篇。

庄子有关系统思想的观点，从他的混沌寓言中可见一斑。这则寓言出现在庄子内篇的最后一篇《应帝王》的最后一节：“南海之帝为倏，北海之帝为忽，中央之帝为混沌。倏与忽时相与遇于混沌之地，混沌待之甚善。倏与忽谋报混沌之德，曰：‘人皆有七窍，以视听食息，此独无有，尝试凿之。’日凿一窍，七日而混沌死。”关于这则寓言的解释很多，从系统的观点来看，混沌代表了一类复杂系统，混沌无七窍，象征了复杂系统天生所具有的不确定性和随机性，‘日凿一窍，七日而混沌死’，说明了复杂系统的不确定性是不可消除的。

（五）屈原、柳宗元

屈原（约公元前 340 年—公元前 278 年，如图 2—5），名平，字原，又自云名正则，字灵均，战国时楚国政治家，诗人。屈原出身楚国贵族，初辅佐怀王，做过左徒、三闾大夫，主张彰明法度，举贤授能，东联齐国，西抗强秦。因遭贵族子兰（怀王幼弟）、南后郑袖谗害去职。顷襄王时被放逐，后因楚国政治腐败，国都郢为秦兵攻破，遂投汨罗江而死。

屈原所作《离骚》、《九章》等篇，反复陈述他的政治主张，揭露反动贵族昏庸腐朽、排除贤能的种种罪行。他在吸收民间文学艺术营养的基础上，创造出骚体这一新形式，以优美的语言，丰富的想象，溶化神话传说，塑造出鲜明的形象，富有积极的浪漫主义精神，对后世影响很大。《汉书·艺文志》著录《屈原赋》25 篇，其书久佚，后代所见屈原作品，皆出自刘向所辑的《楚辞》。

屈原的系统思想观，在他的著作《天问》中得以体现。《天问》是一篇充满强烈的理性探索精神和深沉文学情思的经典诗作，是屈原对宇宙自然、人类社会总体认识的总结与升华的一种艺术再现。作者借助他深厚的文学素养，以提问求解的方式，通过对古代社会具有至尊意味的“天”的责难发问，打破传



图 2—5

统观念的束缚，以旷代未有的磅礴气势，将深湛的思考、大胆的怀疑和执著的探索指向生存世界的各个层面。

柳宗元（公元 773 年—公元 819 年，如图 2—6），字子厚，河东解（今山西省运城县解州镇）人，唐代杰出的文学家和思想家，在散文和诗歌的创作方面，有着很高造诣，文学上与韩愈一起提倡古文运动，同被列入“唐宋八大家”之中，并称“韩柳”。

他的文学主张是“文道并重”，强调创作态度必须严肃认真。他的创作可分为传记、论文、山水游记、寓言四种，以山水游记和寓言的文学成就最高。柳宗元在诗歌创作上的成就也主要体现在山水诗的创作上。他的诗不同于其他人的山水田园诗，而是借诗表现了对现实社会的不满和自身不幸的感叹。



图 2—6

自屈原《天问》产生后，在中国历史上对屈原所提问题做出了回答的，恰恰不是科学家，而是唐代诗人柳宗元，柳宗元在《天对》中批判地继承了《天问》的思想，并根据当时的自然科学水平，一一回答了《天问》提出问题。《天问》和《天对》是科学诗作的姐妹篇。从元气本位论出发，吸取古代混沌中生长天地的思想，把天地的产生完全看做是自然界本身发展变化的结果，这种唯物主义的天体演化观点在柳宗元《天对》中有着十分清晰的阐述。

三、古代系统思想的观点

通过以上简单的回顾，我们可以形成这样一个基本评价：古代的思想家们曾经认真地思考过有关系统和复杂性的各种问题。在他们那个时代，学科还没有分得那样细，他们往往都是通晓当时人类各种知识的全才。正因为如此，他们比较注意从全局、从根本上去把握事物，从而能够形成比较准确的、比较符合客观实际的，因而也是比较科学的观点。当然，由于历史与技术条件的限制，他们的这些观点不可避免地带有许多猜测甚至神秘主义的成分，但是，同一个人的思想发展过程一样，人类也必然经历从幼稚到成熟的成长过程。概括地说，古代的系统观点可以归纳为以下四个主要方面。

第一，整体观，即认为宇宙以及各种层次上的复杂系统是不可分割的整体，只有把握全局，才能真正认识并掌握它。科学的整体观认为：分解只是人类认识复杂事物的方法之一，当我们把一个复杂事物分解为它的各个组成部分时，这些部分就已经失去了作为整体的一个部分的一系列关键属性。当人们解

剖一只青蛙时，切下来的肌肉已经不再是活的青蛙的一部分，它的运动规律、属性已经变了。因此，系统整体不是系统各部分的简单累加，当若干部分组成整体时，已经有新的质产生，而且往往正是这种新的质，体现了该整体的特有的性质与功能。当系统瓦解，各个部分各行其是的时候，这些新的质也就不复存在了。分解，或者还原论的方法无疑是需要的、有益的；然而，综合的、整体论的方法同样也是必要的、有益的。系统的规模越大，情况越复杂，综合方法的重要性就越显著。

然而，形而上学观念中的“整体”却不具备这样的性质。既然“整体等于它的各部分之和”，那么，在部分组成整体时，就没有任何新东西产生，除了各部分的属性之外，整体自己没有任何实质性的功能与性质。按照这种观点，认识复杂事物，就是认识它的各部分，只要把各部分认识清楚了，整体也就自然而然地清楚了。事实上，无数事实已经表明，这种想当然的“自然而然”是不符合客观实际的。例如，了解了齿轮和杠杆的原理，并不能“自然而然”地明白机床的设计思想。按照这种思想方法去做事，就必然导致“只见树木，不见森林”，也就必然导致各个局部之间的对抗、矛盾与冲突，使得整体功能不能正常地实现，导致整体崩溃和瓦解。这种情况在社会生活和管理实践中屡见不鲜。

第二，演化观，即认为宇宙或复杂系统的当前状态是长期演化的结果，只有把它作为一种进化过程的产物，才能理解和掌握它。

古代人类是从时间的概念引入这种演化观的。从长期的观察中，人类认识到世界并不是固定不变，即使是貌似永恒的星空，也在不断发生变化，不断涌现出新星和超新星。古代人类最重要的科学成就天文和历法正是基于这种科学态度的长期研究与观察的成果。进一步，古代的许多思想家基于这些成果，以各自不同的表达方式，把这种演化或进化的观点，溶入了自己所设想的世界图景。

演化观的反面则是静止的、僵化的观点。完全否定变化和发展的观点与现实的距离太大，一般不会得到人们赞同。然而，这并不等于科学的演化观能够不战而胜、自动地为人们所接受。最常见的与演化观相对立的，是循环论，即把发展和演化看做是一系列状态的循环与重复。这种观点虽然在表面上承认运动和变化，但是实质上否认了宇宙与复杂系统的真正的变革。这种观点把变化与发展仅限于日出日落、鸡生蛋蛋生鸡这种相对稳定的重复和循环。在这种观点中，一万年前的宇宙和现在的宇宙、现在的宇宙和一万年后的宇宙，也不会有什么本质的区别与变化。或者说，他们否认宇宙有真正的历史。所以，古代

思想家能够根据当时有限的观察基础，提出演化或发展的观点，是很不简单的。这不能不说是一种正确的直觉或天才的预测。

第三，层次观，即认为宇宙和复杂系统是分层次的，层次之间互相联系又互相区别，构成了整个宇宙或复杂系统。

关于层次的思想，在但丁的《神曲》中，得到了完整的发挥。但丁所描述的宇宙，共分为三界，二十三层。通过幻想和文学的形式，作为中世纪最后一位思想家，但丁以艺术的方式表达了人类对宇宙万物的认识。实际上，几乎所有的民族和宗教在对宇宙的描述框架中，都有各自的层次结构。总之，对于层次，古代人类通过自己的实践，已经有了比较深刻的认识，因而，在他们所描述的世界图景中，层次的区分和跨越常常起着关键性的作用。

围绕层次的问题，古代系统观认为，首先，层次之间的区别不仅是量的区别，而且同时是质的区别。用古代思想家的形象描述来形容，跨越层次需要经过“脱胎换骨”；上一个层次对下一个层次来说，都是无穷大；而每跨越一个层次（不论是向上，还是向下），都是一个新的大千世界。在这里，层次的观念蕴含着宇宙在质的方面是无限的这一重要思想。其次，层次之间存在既有联系又有区别的辩证关系。不同层次之间的事物以及它们的性质之间是有相互联系的，但是这种联系并不是简单的汇总或统计的关系，而是有着各种特定的方式与途径。如果认为上一层次的规律可以简单地归结为下一个层次，或者认为不同层次之间都服从于同样的、有限的几条规律，那就在事实上否认了层次之间质的差别，也就从根本上抹杀了层次。当然，要把这种辩证关系弄清楚，特别是结合各领域的具体情况，明了每个细节，绝不是容易的。

第四，活力观，即认为事物的运动、发展和变化，任何系统的发展和演化，都是由其内在的、本质的属性所推动的，而不是外力强加的。

在这个问题上，古代思想家们明确地指出：运动、发展、变化是物质的根本属性，不运动的物质和没有物质的运动都是不可能的。而无论是整个宇宙，还是任何事物，发展变化的根本动力都来源于其内部，来源于系统组成元素的活力。因此，没有必要到系统（或宇宙）之外去寻找带有神秘色彩的“第一推动力”。

这种观念虽然在当时不可能得到实验事实的证实和支持，但却为科学的发展提供了有益的导向与启发。与形而上学的，把物质看成是僵死的、被动的观点相比，这种活力观无疑具有更积极的作用和意义。

综上所述，古代思想家们对于系统、复杂性的许多论述是十分深刻的，其中主要的是整体观、演化观、层次观、活力观四个要点，他们的许多论述至今

仍值得我们反复玩味，体会再三，年代的久远不但没有磨灭这些思想的光辉，反而使它们更加放射出迷人的、智慧的光芒。

第二节 近代科学思想中的系统思维

一、近代系统科学的发展

我们所说的近代科学，是指从大约三四百年前开始形成的，以培根、牛顿、伽里略、笛卡儿等为代表的科学思想体系，以及在此基础上发展起来的一系列学科和理论。这就是一般所说的，从文艺复兴开始的、针对中世纪教会的思想禁锢的近代史上的科学和技术革命。

弗朗西斯·培根首先举起了“知识就是力量”的旗帜。针对长达1 000多年的思想禁锢，他提出了以实验为基础的思想方法，使科学从神学的奴仆地位中解放出来。其后，伽里略实践了培根的思想，用一系列科学实验向僵死的教条宣战，为哥白尼的学说声辩，写下了科学向迷信挑战的光辉历史篇章。到了牛顿时代，以天文学为先导，以物理学，主要是力学的基本定律为核心，近代科学摆脱了神学的桎梏，为人类提供了比较科学地认识与理解大自然的思维框架和认识方法，而且新的思想和方法已经形成了比较完整的体系。

近代科学思想体系的建立，对人类文明的发展具有非常重要的意义。人类思想得到了空前的解放。各种学科纷纷建立起来，首先是物理学领域中的电学、光学、声学，然后是化学、生物学、地质学、医学以及作为普遍表达方式的数学，同时，经济学、政治学、社会学、心理学等与人文、社会相关的学科也都以全新的面貌出现，各种学科从古代思想家的零星的思想萌芽，发展成为有严密逻辑体系的、有丰富实证内容的、现代意义下的真正的科学。

二、代表人物

(一) 培根

弗兰西斯·培根（1561—1626，如图2—7），与莎士比亚同时代，哲学史和科学史上划时代的重要人物，英国17世纪杰出的唯物主义哲学家，在人类思想史上占有极重要的地位，马克思曾誉之为“英国唯物主义和整个现代实验科学的真正始祖”。

培根是第一批意识到科学的历史意义以及它在人类生活中可能扮演的角色的人。他企图通过分析和确定科学的一般方法和表明其应用方式,给予新科学运动以发展的动力和方向。培根是一个哲学家,而不是科学家。他一开始就探索实验方法的各种可能性,他说他要做科学上的哥伦布。1605年他出版了第一本书《学术的进展》,这是解释他的见解的最早的一部通俗读物。



图 2—7

《新工具》是培根最重要的著作,这本书的目的是提倡人们采用实验调查法。由于亚里士多德的演绎逻辑方法存在不足,因而需要一种新的逻辑方法——归纳法。知识并不是我们推论中的已知条件,而是要从事实中归纳出的结论性的东西。人们要了解世界,就必须首先去观察世界。培根指出要首先收集事实,然后再用归纳推理手段从这些事实中得出结论。他的这种思想对观察和实验有重大意义,构成了自那时起科学家一直所采用的方法的核心。

虽然培根是科学的指路人,但是他自己却不是一位科学家。培根正确地指出热是一种运动形式——一个重要的科学学说,但是在天文学上他却拒绝接受哥白尼的学说。不过人们应该记住培根不是要提出一套完整的、正确的科学定律,而是要提出一个应该学什么的概说。他的科学猜想意在作为进一步探讨的起点而不是作为终极的结论。

(二) 笛卡儿

勒奈·笛卡儿(René Descartes, 1596—1650, 如图 2—8), 法国哲学家、数学家、物理学家。他对现代数学的发展做出了重要贡献,因将几何坐标体系公式化而被认为是解析几何之父。他还是西方现代哲学思想的奠基人,他的哲学思想深深影响了之后的几代欧洲人,创立了“欧陆理性主义”(Continental Rationalism) 哲学。



图 2—8

笛卡儿被广泛认为是西方现代哲学的奠基人,他第一个创立了一套完整的哲学体系。哲学上,笛卡儿是一个二元论者以及理性主义者。笛卡儿认为,人类应该可以使用数学的方法——也就是理性——进行哲学思考。他相信,理性比

感官的感受更可靠。他从逻辑学、几何学和代数学中发现了 4 条规则：(1) 除了清楚明白的观念外，绝不接受其他任何东西；(2) 必须将每个问题分成若干个简单的部分来处理；(3) 思想必须从简单到复杂；(4) 我们应该时常进行彻底的检查，确保没有遗漏任何东西。笛卡儿将这种方法不仅运用在哲学思考上，还运用于几何学，并创立了解析几何学。

笛卡儿的解析几何是作为《方法论》一书的附录《几何》出现的。这部分共三卷，第一卷题名为“关于只用圆和直线作图的可能问题”，它的前半部分介绍了用代数方法解几何问题的几个例子，尚未使用坐标，因此还不是真正的解析几何；后半部分通过解“帕普斯问题”的具体过程，介绍了解析几何方法，所谓笛卡儿解析几何主要就体现在这一部分中。第二卷题为“曲线的性质”，这里，笛卡儿在批判地吸收古希腊数学家的曲线分类思想的基础上，叙述了对曲线按方程的次数进行系统分类的方法。第三卷题为“关于立体和超立体的作图”，介绍了利用圆锥曲线在代数方法下解立体问题的方法，其中包括笛卡儿在代数学上的两个著名结果：“代数学基本定理”以及“笛卡儿符号法则”。

笛卡儿把以往对立的两个研究对象“数”与“形”统一起来了，并在数学中引入了变量的思想，从而完成了数学史上一项划时代的变革。这一工作不仅使整个古典几何领域处于代数学的支配之下，而且从此开拓了一个变量数学领域，从而加速了微积分的成熟。

(三) 牛顿

伊萨克·牛顿爵士 (Isaac Newton, 1642—1727, 如图 2—9), 伟大的物理学家、天文学家和数学家, 经典力学体系的奠基人。他在 1687 年 7 月 5 日发表的《自然哲学的数学原理》中提出的万有引力定律以及他的牛顿运动定律是经典力学的基石。牛顿还和莱布尼茨各自独立地发明了微积分。牛顿被誉为人类历史上最伟大的科学家之一。他的万有引力定律在人类历史上第一次把天上的运动和地上的运动统一起来, 为日心说提供了有力的理论支持, 使得自然科学的研究最终挣脱了宗教的枷锁。



图 2—9

牛顿在物理学、天文学和数学方面的贡献是卓越的。16 世纪丹麦天文学家第谷对行星绕日运行作了长期的观测, 记录了大量

准确可靠的天文数据资料，他死后 20 年，由德国天文学家开普勒整理分析这些资料，总结出行星运动三定律——开普勒定律。牛顿又在该定律的基础上总结提高，得到万有引力定律，完成了从观测的原始材料（第谷）到经验规律（开普勒）再到动力学规律的、由实验到理论过程的三部曲。万有引力定律不但能解释行星的运动，而且还能解释其他天体的复杂运动及地球上的潮汐现象等。牛顿的万有引力理论一直用于天文学，直到广义相对论出现后才被修正。

1687 年 7 月《自然哲学的数学原理》拉丁文版问世。1729 年由莫特将其译成英文付印，即今所见流行的《原理》英文本。《原理》的开头和第一编介绍了力学的基本运动三定律与基本的力学量；其中质量的概念是由牛顿首先提出及定义的。《原理》第二编中，讨论了物体在阻尼介质中的运动，提出阻力大小与物体速度的关系公式，还研究了气体的弹性和可压缩性以及空气中的声速等问题。《原理》第三编题为宇宙体系，讨论了太阳系的行星、行星的卫星和彗星的运行以及海洋潮汐的产生，涉及多体问题中的摄动。全书贯穿了牛顿和莱布尼茨分别独立发明的数学方法——微积分法，这是牛顿最伟大的成就之一。

牛顿一生的重要贡献是：集 16、17 世纪科学先驱们成果的大成，建立起一个完整的力学理论体系，把天地间万物的运动规律概括在一个严密的统一理论中。这是人类认识自然的历史中第一次理论的大综合。以牛顿命名的力学是经典物理学和天文学的基础，也是现代工程力学以及与之有关的工程技术的理论基础。这一成就，使以牛顿为代表的机械论的自然观，在整个自然科学领域中取得了长达 200 年的统治地位。

（四）康德

伊曼努尔·康德（Immanuel Kant, 1724—1804，如图 2—10），启蒙运动时期最重要的思想家之一，德国古典哲学创始人。他的思想使哲学深入到了一个新的理论维度，不仅对近代哲学进行了一番彻底的清理，引发了蔚为壮观的德国古典哲学运动，而且对现代西方哲学产生了深远的影响。

康德的一生可以以 1770 年为标志分为前期和后期两个阶段，前期主要研究自然科学，后期则主要研究哲学。前期的主要成果有 1755 年发表的《自然通史和天体论》，其中提出了太阳系起源的星云假说。在后期从 1781 年开始的 9 年里，康德出版了一系列涉及领域



图 2—10

广阔、有独创性的伟大著作，给当时的哲学思想带来了一场革命，它们包括《纯粹理性批判》（1781年）、《实践理性批判》（1788年）和《判断力批判》（1790年）。“三大批判”的出版标志着康德哲学体系的完成。

前期，康德在匿名出版的《自然通史和天体论》里，生动地解释了无限宇宙的各部分在空间中的联系，探索天体的根源及其运动变化的规律；提出了在天文学史上有重大意义的太阳系自然形成的“星云说”。他立足于牛顿力学，而在世界观上却超出牛顿。后期，康德全面地考虑了休谟对因果律的疑难，他欣赏休谟根据经验论对因果联系观念的起源问题所做的分析，认为这种分析很有启发性，但是坚决反对休谟否认因果联系必然性的错误结论。康德建立了独特的批判哲学体系，其中包括以先验论、二元论和不可知论为基本特征的认识论，以及在此基础上的伦理学、美学等。近几十年来，康德哲学在西方哲学界仍是研究的重要科目，具有很大的影响。

（五）达尔文

查尔斯·达尔文（Charles Darwin, 1809—1882, 如图2—11），英国著名的博物学家。达尔文出生于英国一个医生世家，他的家人希望他秉承家族的传统，从事医学事业。18世纪20年代，达尔文在苏格兰爱丁堡大学的医学院学习，但由于他对自然历史产生了浓厚的兴趣，他因此而退学。19岁，达尔文的家人把他送到剑桥大学去学习神学，希望他成为一个乡村牧师，但是达尔文对自然历史的兴趣变得越加浓厚，完全放弃了对神学的学习。在剑桥学习期间，达尔文结识了当时著名的植物学家亨斯罗和著名地质学家赛特维克，并接受了植物学和地质学研究的科学训练。



图 2—11

1831年夏天，达尔文在亨斯罗的推荐下，以一名不拿任何报酬的博物学家身份随英国海军探测船“贝格尔号”参加了历时5年的环球考察，所见所闻对其生物进化思想、自然选择学说的形成产生了重要的影响。1859年达尔文发表了《物种起源》一书，书中用大量的事实证明了生物变异的普遍性、变异与遗传的关系，提出了生存竞争和自然选择学说，系统地论述了物种形成的机制。该书的发表标志着现代生物进化理论的形成，引发了近代最重要的一次科学革命，因而达尔文被称为生物进化论的奠基人。

所谓进化论，是一种认为世界及其中的事物，尤其是有机界，不断地从简单向复杂、从低级向高级发展演变的学说。这种学说早在启蒙运动时就作为基

基督教创世说和设计说的对立面而流行。但直到 1859 年达尔文发表《物种起源》，进化论才成为一个比较完善的科学理论。达尔文的主要信条是：有机界经过一种自然选择的过程而发展，在这一过程中，那些最适应环境的物种成员，是最适合生存下来并不断繁衍的。达尔文的进化论在欧洲起初是以自然科学形态存在的，但随后即对哲学产生了深刻的影响。

达尔文进化论是跨时代的发现，有着深远的意义。首先，达尔文进化论是 19 世纪生物科学的最大成就，是生物科学的一次理论综合，从达尔文开始，把生物科学作为一个整体来研究，并且从发展的观点对生物进行研究；其次，进化论的提出，在人类整个思想史上也是划时代的大事。17 世纪的牛顿把上帝从无生命现象的研究领域中驱逐出去，现在，进化论又把上帝从有生命现象的研究领域中驱逐出去了。

三、近代系统科学的局限性

历史从来不会停止前进的脚步，任何辉煌的进步都不会是至善至美、无法再前进的终极顶点。在人类历史上曾经有过许多个文明发展的高峰，但是不会有永远无法超越的顶峰。每个高峰都是空前的，但决不会是绝后的。作为一定历史阶段的产物，近代科学的思想体系与方法也有其弱点和局限性。

事实上，在 20 世纪初，19 世纪中叶，这种局限性就已经开始显露出来。19 世纪中叶，达尔文主义的诞生，曾经引起轩然大波。除了与神学的直接冲突之外，达尔文主义事实上也对近代科学的基础——经典物理学的发展观提出了疑问。世界是不是有真正意义上的历史？5 万年前的宇宙、今天的宇宙以及五万年后的宇宙是否有真正的差别？按古典物理学的观点，只有量的差别，没有质的差别，所谓的发展变化，只是量的变化，只是循环往复。但是达尔文的发现却明确地表明，自然界有真正的历史，物种是在变化着的，有些物种消失了，有些物种出现了，今天的生物界与五万年前的生物界是有很大的区别的。

针对这种状况，恩格斯在《自然辩证法》中一针见血地指出：虽然近代科学在知识上和技术上都超越了古代，但是，他们在一般自然观上却远远落后了。……哥白尼在这一时代的开端给神学写了绝交书；而牛顿却以神的第一推动力的假定结束了这个时代。

恩格斯对于达尔文主义的出现、康德星云说的提出、细胞的发现等三项进步给予了高度的评价。认为它们突破了这种在当时占统治地位的，形而上学的观念。

恩格斯在总结这种思想上的进步时指出，这些伟大的发现使得我们又开始重新认识这样一种观点，即整个自然界的物质都处于永恒的产生和消灭中，处于不间断的流动中，处于无休止的运动和变化中。在古代思想家那里还只是天才的直觉的东西，在我们这里却已经是严格的科学、以实验为基础的研究结果。

如果说，恩格斯那个时代许多实验的证明还是空白的话，那么这些空白中的许多环节今天已经被新的发现所填补上了。如果说康德的理论还是一个假说，那么，今天的天文学已经牢牢地站在实验和观测的基础上，大爆炸宇宙学已经得到许多科学观测和实验的支持。如果恩格斯看到 DNA 结构的发现，他一定会比对于细胞的发现表现出更大的喜悦。当然，正像科学中常见的那样，一个问题的解答，往往又会带来许多新问题。然而，十分明显的是，从总的发展方向 and 趋势上看，恩格斯的论述确实表现出了高度的预见性。

今天，近代科学的局限性更加明显地暴露出来。一件又一件的新发现，无可辩驳地表明：牛顿、拉普拉斯的平直的三维时空只是适用于一定范围的、对自然界的近似描述，而绝不是最终的宇宙图景的基石。同时，这种否定之否定正如恩格斯所指出的，表现为向古代的、朴素的然而原则上是正确的自然观的回归。同时，恩格斯还正确地指出了近代科学中僵化的自然观的几个主要特点：忽视整体、忽视变化和发展、把物质和运动分割开来。

当然，无论多么伟大的思想家，都只能立足于自己时代的知识和经验之上。这 100 多年来科学的丰硕成果，已经远远超出了恩格斯所讨论的范围。大爆炸宇宙学对于康德的星云说，DNA 双螺旋结构对于细胞学说，都相当于今天的超音速飞机与莱特兄弟的最初模型，虽然它们的方向是一致的，但是其发展程度有了天壤之别。

首先对近代科学思想体系形成巨大冲击的，是 20 世纪初的两件大事：相对论与量子力学的诞生。相对论证明了牛顿建立的绝对时空只具有相对的真理性和量子力学则告诉我们，在微观尺度下，经典力学的规律已经不再起作用，而必须有新的观点与描述方法。这种冲击是根本性的，难怪人们当时称之为“物理学的危机”，“科学的危机”，因为这两个事件确实动摇了近代科学的一系列最基本的假设。

今天来回顾近 100 年前的这场风波，我们可以说，其实质正在于这两项发现击中了近代科学思想体系的根本问题之一，即对系统观点的忽视和背离。如上一节所讨论的，古代思想家对于系统和复杂性的观点，有许多合理的成分，或是正确的猜测。近代科学在正确地反对中世纪神学的时候，把古代思想家的

这些正确的理念也丢掉了，造成这一偏颇的根源在于片面强调还原论的思想。

所谓还原论是指这样一种观点：对于任何事物，特别是复杂事物的认识和理解，可以通过对它的组成部分的认识和理解去实现，因而对于复杂事物、复杂系统的运动规律，应当从它的各个部分的运动规律中推导出来。

作为认识复杂事物的一种方法，还原论，即分解或分而治之的方法无疑是一种必不可少的、而且在许多情况下是行之有效的方法。解剖学帮助人们认识了动物体以及人体的详细构造与各种器官的功能；对于原子结构的认识使化学建立在全新的、更为坚实的基础上；正是在成百上千年观测的基础上，从一个又一个恒星、行星以及彗星的运动轨迹中，天文学才逐步形成了它的理论体系。分解方法的成功案例是不胜枚举的。我们今天享受着的物质与精神文明，正是建筑在许多这样的研究成果与发明之上的。

然而，关键在于，分解或者还原并不是足以保证人们完全地认识世界和成功地做事的充分条件。如果因为还原方法的一系列成功而把它的作用片面地、无限地夸大，甚至认为它是人类惟一的认识方法，那么过去的成功将成为进步的障碍和桎梏。显然，这种思想与我们所说的系统观是对立的。如果我们仔细看一下近代科学的许多代表性著作，则不难发现，这种片面强调还原论的影响比比皆是，根深蒂固。这正是近代科学的思想方法在实际中处处碰壁的主要原因之一。我们常批评的“头痛医头、脚痛医脚”的处世方法，就是缺乏整体观念的一种表现。

分解方法本身无疑是有效的。问题在于不应该把它绝对化、僵化，以致认为只要靠它就能完全解决所有的科学与认识问题。或者反过来说，以为整体的一切性质都可以归结为它的各部分的性质，即：不承认各部分组成整体时，增添了新的内容、新的质。这种观点就是我们所说的片面强调还原论的观点。

说到部分怎样组成全局，以前的科学仅限于量的积累和计算。因此，普遍存在的认识是：只要有了计算方法和足够的计算能力，全局的所有性质和行为都可以从局部的属性（通过数学运算）而推演出来。这种想法曾经是相当普遍的。在计算机产生时，许多人曾经兴奋不已，认为计算机的能力足以解决任何庞大烦琐的计算问题，只要有了算法，剩下的只是计算时间的长短问题而已，似乎只要计算机的速度不断提高，就没有克服不了的障碍。这样一来，所有事情只剩下寻求算法的问题了，只要找到了算法，其余的一切都可以留给计算机去做，世上所有问题就都可以用计算机一劳永逸地解决，关于质的差别的思考就没有存在的价值和必要了。

然而，好景不长，NP问题的提出，计算复杂性理论的研究进展，使人们

不得不放弃这种过于乐观的想法，回到较为实际的、承认质变的客观存在的观点上来。所谓计算复杂性理论，简单地说，就是人们对于计算问题所需要的时间或工作量的深入分析和认识。人们看到，事情并不像想的那么简单。一些似乎很简单的计算问题，却面临极其巨大的计算量，在现有的、以致今天可以想象的任何计算机上都无法实际运行。例如，著名的旅行推销商问题、棋类游戏等。这就给否认质变、把一切归于量变的观点以沉重的打击，这也从一个方面促进了上述思想变化的过程。

具体地说，片面强调还原论的思想在以下四个方面表现出它的局限性。

首先，这种思想否定整体观，它是典型的“只见树木，不见森林”的观点。从这种观点看来，化学研究的是分子运动的规律，而分子是由原子组成的，所以分子运动的规律应当而且只能从原子运动的规律推导出来，因此，化学没有独立存在的必要，至多作为原子物理学的推论。按这种逻辑，世界上只要有基本粒子物理学就够了，显然，这只能堵塞科学前进之路。

由于否定了部分组成整体时有新的质产生，这种思想也必然拒绝演化、进化的观点。既然世界只不过是一些基本构件在组合和分解，而且在这过程中没有什么新的事物和规律产生，那么还有什么演化或进化可言呢。特别是由于对于热力学第二定律的误解，近代科学在描述和认识从简单到复杂的演化过程方面显得无能为力，甚至不得不回避许多明显的、无法解释的现实。例如上面提到的物理学和生物学的进化观的对立。

层次的观点是系统思想的核心之一。片面强调还原论的思想否认层次之间质的差别，因而总是试图用某一个层次的规律去“统一”地解释不同层次的现实情况。这在力学方面最为明显。一直到本世纪初，人们都把牛顿三定律看做在任何尺度上都可以适用的普遍规律。正因为这样，当普朗克发现在微观层次上，牛顿定律无法解释许多现象，从而创立量子力学的时候，许多人感到非常突然而无法接受。

同样地，近代科学在正确地反对神学的同时，丢掉了物质与运动不可分割的观点。在近代科学的框架中，各种物体是被动的、死的对象，它的运动、发展、变化的动力都来自外部。这种思想使牛顿不得不回到神学、去寻找所谓第一推动力。

总之，近代科学在人类历史发展中发挥了巨大的作用，创造了辉煌的成就。但是，随着人类认识的深入与扩展，它们的不足与局限性也日益暴露出来，而和现代科学和社会的实际情况不相适应。在它们的不足和局限性中，对系统观点的忽视，丢掉古代思想家的有关系统的一系列正确的论述和观点，是

十分突出的一个方面。

第三节 现代系统科学的兴起和发展

一、现代系统科学的兴起

正是在对近代科学的不足和局限性的思考中，现代科学，包括现代系统科学成长起来了。相对论和量子力学的出现，预示了新的科学时代的到来。但是，对于这两项重要发现的深刻意义，人们并不是一开始就能够理解的。即使在物理学家的范围内，在相当长的一段时间里，许多人仍然坚持认为这只是一种算法或具体处理方法，仍然不愿意放弃牛顿力学为人们描绘的世界图景的基本框架。至于在专业的物理学家范围之外，人们对于这些新思想新观点的了解与认识就更少了。

从 20 世纪 30 年代开始，现代意义下的系统科学开始在学术界建立起来。贝塔朗菲的一般系统论在这方面发挥了积极的作用。他明确地重新强调整体观，猛烈地抨击了“只见树林，不见森林”的观点。作为一名医生和生物学家，他痛感机械论观点对科学进步造成的障碍，反复地强调对于生物，以及对于任何复杂的事物，都必须从整体上去把握它。贝诺朗菲重新提起了亚里士多德的著名论断“整体大于它的各部分之和”。当然，由于当时研究环境与条件的限制，贝塔朗菲的研究缺乏定量的、可操作的具体内容，因而在科学界引起根本性的变革。然而，其提倡系统观、反对片面强调还原论的突破作用是不容否认的。

40 年代，维纳的控制论和香农的信息论代表了定量地、具体地研究复杂系统的开始。维纳抓住了生物体内和机械中共同的信息传递和控制问题，提出了一般性的模型与处理方法。在还原论思想占据着统治地位、各学科致力于越分越细而且彼此老死不相往来的氛围中，维纳的工作起到了创新的作用。他以严谨的数学工具为手段，抓住了复杂系统中的信息和控制这个中心议题，形成了全新的思路与方法。维纳的控制论使他取得了巨大的成功。其后的工程控制论、经济控制论等都是在这个方向上发展起来的。香农则从通信的研究入手，首次提出了信息的定量测度，并且把信息和熵联系起来。

上述“三论”（一般系统论、控制论、信息论）的出现，标志着现代系统科学已经正式登上了舞台，开始成为学科，并且逐步引起了各界的关注，是现

代系统科学的真正起点。

在这一阶段还有两件事情与系统科学的诞生有密切关系。一件事情是哥德尔不完全性定理的证明，它宣告了近代科学赖以建立起来的逻辑方法本身也是有局限性的，用目前的逻辑方法是不可能建立起一个既完全又无矛盾的理论系统的。这对于沉溺于逻辑方法之中的人们来说，简直是晴天霹雳。因为片面强调还原论思想，是指望能够在少数几个有限的基本原理基础上，单纯使用逻辑方法就建立起最终的、穷尽一切真理的理论体系。然而哥德尔定理的重要意义正在于它确认了世界在质的方面的无限性，而这正是系统思想所要强调的要点之一，对于从事系统科学研究的人们来说，这恰恰表明了片面强调还原论思想的破产。

另一件事是现代数字式电子计算机的出现。正如国外有些专家所指出的，计算机是系统科学的实验室。从这几十年的发展看，计算机确实为系统科学的研究提供了非常有利的条件，发挥了不可替代的作用。事实上，计算机本身就是一个复杂系统，它的许多研究工作对于系统科学也是很有启发的。例如，关于计算复杂性问题的研究，就是有关层次观点的一个极好例子。

发生在 20 世纪中叶的这两件事，对于系统科学的成长都起了非常重要的推动作用。当然，其他许多学科的发展也为系统科学提供了许多有益的启示，如化学中的化学震荡现象（B—Z 反应）、生物学中蛋白质分子双螺旋结构的发现、宇宙学领域的大爆炸理论，等等，这里不再一一列举。

自 20 世纪 60 年代以来，系统科学进入了蓬勃发展的阶段。这时的发展，已不再只在近代科学所忽视的交叉领域内进行，而是深入到传统学科的核心去攻坚。例如，热力学中远离平衡态的状态——耗散结构的研究，激光物理、凝聚态物理的研究，以及协同学、突变理论等。这些新的学科分支，从不同角度揭示了大自然的丰富多彩，表明了近代科学在片面强调还原论的思想束缚下，忽略了许多有趣的事实和丰富多彩的内容，从而证明了用系统观点武装的现代科学思想的巨大潜力。由于上述所谓“新三论”（耗散结构理论、协同学、突变理论）以及相关研究成果的陆续问世，科学界逐步接受了新的系统观，开始摆脱单纯强调还原论的束缚。至此已经可以说，科学的又一次思想解放正在到来，人类文明的又一个高峰正在我们的面前展开。这种认识已经不再只是少数先知者的预言，而是已经深入到社会各界，成为各领域学者和各界人士的共识。

80 年代以来，关于系统的研究进一步深入，混沌现象的研究打破了传统科学中把确定性和不确定性截然分割开的思想障碍，以大量客观事实和实验表

明，正是确定性和不确定性的相互联系和相互转化，构成了丰富多彩的大千世界，其中的许多现象与规律是无法在绝对排斥随机性的旧思想框架中解释的。最诱人的、最精细的生命现象，恰恰是产生于混沌和有序的边缘之处。作为描述有关混沌现象的数学工具，分形的研究也引起了广泛的关注，这不只是由于分形图案的神秘和美丽，更主要的是它预示着数学的重大变革。目前，关于混沌和分形的研究正在走向深入，走向各个实际应用部门，而在理论方面的研究成果，则对系统科学的进一步发展提供了许多重要的启发。

从 80 年代到 90 年代，许多从事系统科学与系统方法研究的学者，不约而同地提出了对复杂性进行深入研究的新方向。1984 年成立的，由来自不同专业领域的一批学者组成的位于美国新墨西哥州圣菲研究所（Santa Fe Institute，简称 SFI），把复杂性（Complexity）作为研究的中心议题，并出版了名为复杂性的杂志，发表了许多专著与论文。我国著名学者钱学森、戴汝为、于景元也于 1990 年发表了题为“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”的论文，提出了开放的复杂巨系统的概念。1994 年，美国学者 J·Casti 发表了专著：《复杂性》，对于复杂的成因及处理方法提出了比较系统的看法。美国密执根大学的 J·霍兰在其 1995 年出版的《隐秩序》一书中则把很大一类复杂性的成因归之于适应性，提出了复杂适应系统（CAS）的概念，使关于复杂系统的研究进入到更加实际、更加可操作的阶段。

回顾 20 世纪以来现代系统科学的发展历程，我们可以概括出以下几个要点：现代系统科学是针对近代科学的不足和局限性提出的，它的主要目标是克服片面强调还原论的偏颇，以科学的最新成果和最新工具，恢复、充实和发展系统观点。

二、代表人物

（一）贝塔朗菲

贝塔朗菲（Ludeig von Bertalanffy, 1901—1972，如图 2—12）是现代著名理论生物学家、一般系统论的创始人。贝塔朗菲 1901 年生于奥地利，早年在维也纳大学学习，获博士学位。1934 年起任该校理论生物学教授。1949 年移居加拿大，先后在渥太华大学、阿伯塔大学任教授，其间在美国南加利福尼亚大学任教授。1969 年以后任美国布法罗城纽约大学教授。1972 年逝世于该城。

贝塔朗菲的重要贡献之一是建立关于生命组织的机体论，并由此发展成—

般系统论。1937 年,提出了一般系统论的初步框架,1945 年在《德国哲学周刊》18 期上发表《关于一般系统论》的文章,但不久毁于战火,未被人们注意。1947 年在美国讲学时再次提出系统论思想。1950 年发表《物理学和生物学中的开放系统理论》。1955 年出版专著《一般系统论》,成为该领域的奠基性著作。60~70 年代受到人们重视。1972 年发表《一般系统论的历史和现状》,把一般系统论扩展到系统科学范畴。



图 2—12

1945 年贝塔朗菲的《关于一般系统论》于《德国哲学周刊》第 18 期上发表,明确提出一般系统论的任务“乃是确立适用于系统的一般原则”,并对系统的共性作了一定的概括,如系统的整体性、关联性、动态性、有序性、终极性(目的性)等。贝塔朗菲提出一般系统论是从有关生物和人的问题出发的。他认为现实是一个有组织的由实体构成的递阶秩序,在许多层次的叠加中从物理、化学系统引向生物、社会系统;因此,不能把分割部分的行为拼加成整体,必须考虑各个子系统和整个系统之间的关系才能了解各部分的行为和整体。他认为分析和人为隔离的方法是有用的,但要看到,分析方法和隔离即使对物理学的实验和理论还都不是充分的。他的这些见解,今天看来是深刻的、前瞻性的。

(二) 庞加莱

庞加莱(Jules Henri Poincaré, 1854—1912, 如图 2—13), 法国著名数学家、物理学家。庞加莱一生发表科学论文 500 多篇、科学著作 30 部,几乎涉及数学的所有领域及理论物理、天体物理等许多重要领域。庞加莱对经典物理学有深入而广泛的研究,对狭义相对论的创立也有贡献。他从 1899 年开始研究电子理论,首先认识到洛伦茨变换构成群。庞加莱被公认是 19 世纪后四分之一和 20 世纪初的领袖数学家,是对于数学和它的应用具有全面知识的最后一个人。



图 2—13

庞加莱的研究涉及数论、代数学、几何学、拓扑学等许多领域,最重要的工作是在分析学方面。他早期的主要工作是创立自守函数理论(1878)。1883 年,庞加莱提出了一般的单值化定理(1907 年,他和克贝相互独立地给出完全的证明)。庞加莱为了研究

行星轨道和卫星轨道的稳定性问题，在 1881—1886 年发表的四篇关于微分方程所确定的积分曲线的论文中，创立了微分方程的定性理论。他研究了微分方程的解在四种类型的奇点（焦点、鞍点、结点、中心）附近的性态。他提出根据解对极限环（他求出的一种特殊的封闭曲线）的关系，可以判定解的稳定性。

在物理学方面，庞加莱研究了受到引力相互作用的三个星体（例如，一个恒星和两个行星）的轨道问题，他考虑到由初始点位置的不同所引起的轨道行为的差异，证明了轨道的复杂性。60 年代以后，人们又继续讨论了一些限制性的三体问题及其他非线性动力学方程的问题，证明了这些方程的非线性项带来了系统的混沌行为，表现出对初值改变的敏感性，系统呈现出长时间行为的不确定性或随机性，从而冲破了牛顿力学的决定论观念，揭示出牛顿力学也具有内在的随机性。

（三）吉布斯

吉布斯（Gibbs, Josiah Willard, 1839—1903），美国物理学家（如图 2—14）。19 岁毕业于耶鲁大学，成为耶鲁的工程学研究生，1863 年取得美国首批博士学位，并留校教授拉丁文和自然哲学。1866—1869 年去欧洲进修，就学于 H. G. 马格努斯、K. 魏尔斯特拉斯、G. R. 基尔霍夫和 H. von 亥姆霍兹等。他是美国科学院、美国艺术和科学研究院以及欧洲 14 个科学机构的院士或通讯院士，并接受过一些名誉学衔和奖章。1869 年回国后一直在耶鲁大学执教，1871 年被任命为数理教授。



图 2—14

吉布斯在热力学和统计物理学方面做出了很大贡献。1873 年发表了他的第一篇主要的热力学论文《流体热力学的图示法》。同年还发表了论文《借助曲面描述热力学性质的几何方法》。1876 年和 1878 年他先后分两部分发表了最著名的论文之一《论非均匀物质的平衡》。由于他在热力学方面的工作，使热力学成为一个严密而全面的理论体系。他提出的化学势概念和由化学势概念导出的相律，使物理化学得到很大发展。他还是近代矢量分析的创建人之一。在统计力学的研究中，他发展了玻兹曼提出的系统概念，创立了统计系统的方法，建立起经典平衡态统计力学的系统理论，1902 年发表了著作《统计力学的基本原理》。通过对几种系统的分析，他发现正则系统最为有用。P. D. 朗道认为吉布斯“对统计力学给出了适用于任何宏观物

体的最彻底、最完整的形式”。

吉布斯对系统科学所做的最伟大的贡献，就是将统计学以一种更彻底的方式引入物理学中来，使得统计方法不仅对于具有高度复杂的系统有效，而且对于像力场中的单个粒子这样简单的系统同样有效。物理测量从来都是不精确的，对于一个动力学系统，我们所知道的，不是全部的初始条件，而是关于它们的某种分布。换言之，物理学的实用部分都不能不考虑到事件的不确定性和偶然性。吉布斯的功绩就在于他首次提出了一个明确的科学方法来考察这种偶然性。

(四) 维纳、香农

维纳 (Wiener, Norbert, 1894—1964, 如图 2—15), 美国数学家。控制论的创始人。维纳于 1909 年毕业于塔弗茨大学, 获文学士学位, 1912 年获哈佛大学博士学位。后留学英国和法国, 回国后先在哈佛大学等校任教, 1919 年到马萨诸塞州理工学院任教, 直到 1960 年退休。维纳在第二次世界大战期间从事雷达和防空火力控制的研究, 以后研究通信和控制技术。他于 1948 年发表了有名的《控制论》一书, 用统一的数学观点讨论了通信、计算机和人类的思维活动, 提出了自动化工厂、机器人、由数字电子计算机控制的装配线等新概念, 促进了通信、计算机、机器人和人工智能等理论的发展。



图 2—15

维纳将控制论定义为：关于在动物和机器中控制和通信的科学。控制论是在 20 世纪 30 年代至 40 年代蓬勃发展的自动控制技术和统计数学的背景下诞生的。从系统科学的发展来说，控制论的诞生和发展有特别重大的意义，因为控制论提炼了包括生物系统和人工系统极为广泛的一大类系统的共性和规律，这一大类的系统实质上也是系统科学研究的主要对象。控制论提炼的基本概念，诸如目的、行为、通信、信息、输入、输出、反馈、控制以及在这些概念基础上的控制论系统模型，即输入—输出—反馈—控制模型，具有广泛的普适意义，并且紧密联系着基础理论和应用技术。因此，从一定意义上说，半个世纪以来，系统科学的发展在总体上是和控制论的发展紧密相关的。

香农 (Shannon, Claude Elwood, 1916—2001, 如图 2—16), 美国数学家。信息论创始人。1916 年 4 月 30 日生于密歇根州盖洛德。1936 年获密歇根大学理学士学位, 1940 年获麻省理工学院哲学博士学位。1941 年起在美国贝尔电

话实验室工作。1956年起任麻省理工学院教授。1938年首次使用“比特”概念；1948年发表《通信的数学理论》，提出负熵概念，1949年发表《噪声中的通信》，从而奠定了信息论的基础。1949年发表《保密系统的通信理论》，使他成为密码学的先驱。1956年与J. 麦卡锡合编《自动机研究》（论文集），是自动机理论方面的重要文献。曾获电气和电子工程师学会（IEEE）的诺贝尔奖等多项世界性科学大奖。1956年当选美国科学院院士，并是多个学会的资深会员。



图 2—16

香农信息论和电子计算机的诞生和发展，是对系统的信息传递和处理过程规律的研究取得根本性突破的里程碑。香农信息论形成的技术背景是通信工程。第二次世界大战对通信的实际需要，迫切要求建立通信理论。香农在1948年发表了《通信的数学理论》，宣告了信息论的诞生。香农的信息论提炼出了包括信源、信宿、信道的信号传输的普适模型，定义了信息量，提出了信源编码定理等重要定理，为一般意义上的信息传输奠定了理论基础。

（五）普里高津、哈肯

普里高津（Ilya Prigogine, 1917—2003，如图2—17），比利时化学家、物理学家，1977年诺贝尔化学奖获得者，非平衡态统计物理与耗散结构理论奠基人。

普利高津认为，只有在非平衡系统中，在与外界有着物质与能量交换的情况下，系统内各要素存在复杂的非线性相干效应时才可能产生自组织现象，并且把这种条件下生成的自组织有序态称之为耗散结构。

耗散结构是在远离平衡区的非线性系统中所产生的一种稳定化的自组织结构。在一个非平衡系统内有许多变化着的因素，它们相互联系、相互制约，并决定着系统的可能状态和可能的演变方向。一个典型的耗散结构的形成与维持至少需要具备三个基本条件：一是系统必须是开放系统，孤立系统和封闭系统都不可能产生耗散结构；二是系统必须处于远离平衡的非线性区，在平衡区或近平衡区都不可能从一种有序走向另一更为高级的有序；三是系统中必须有某些非线性动力学过程，如正负反馈机制等，正是这种



图 2—17

非线性相互作用使得系统内各要素之间产生协同动作和相干效应，从而使得系统从杂乱无章变为井然有序。也就是说，系统的发展过程完全可以经过突变，通过能量的耗散与系统内非线性动力学机制来形成和维持与平衡结构完全不同的时空有序结构。这就是耗散结构理论的精髓所在。一个对象要想在实践中获得存在与发展，必须不断地从外界引入负熵，以抵消对象体内正熵的增加，从而确保对象不断地走向更高层次的稳定有序结构。

普利高津在他的《确定性的终结》中，通过考察西方的时间观，向我们显示，只要遵循现实世界的概率过程，我们就将远离僵化的决定论力学。他指出，量子力学可以推广到用来证明时间的天然不可逆性；时间先于大爆炸。普利高津解构了确定性世界观，认为人类生活在一个可确定的概率世界，生命和物质在这个世界里沿时间方向不断演化，确定性本身是一种错觉。

哈肯 (Haken, Hermann)，德国物理学家（如图 2—18）。协同学创始人。1927 年生于德国，1951 年获埃尔朗根大学数学哲学博士学位并留校任教，1956 年任理论物理学讲师。1960 年任斯图加特大学理论物理学教授。主要从事激光理论和相变研究。他建立序参量演化的主方程；解决了导致有序结构的自组织理论的框架，并用突变论在有序参量存在势函数的情况下对无序—有序的转变进行归类，于 20 世纪 70 年代创立了协同学。著作有《激光理论》、《协同学——物理学、化学和生物学中的非平衡相变和自组织引论》。



图 2—18

哈肯于 1969 年提出了协同学 (synergetics)。哈肯发现激光是一种典型的远离平衡状态时由无序转化为有序的现象，但他发现即使在平衡状态时也有类似现象，如超导和铁磁现象。这就表明，一个系统从无序转变为有序的关键并不在于系统是平衡或非平衡，也不在于离平衡态有多远，而是通过系统内部各子系统之间的非线性相互作用，在一定条件下，能自发产生在时间、空间和功能上稳定的有序结构，这就是自组织。哈肯还指出，系统在临界点附近的行为仅由少数慢变量决定，系统的快变量由慢变量（序参量）支配，这就是所谓的役使原理。

耗散结构理论和协同学从宏观、微观以及两者的联系上回答了系统自己走向有序结构的基本问题，两者都被称为自组织理论。耗散结构理论和协同学都源自于具体学科，耗散结构理论是物理化学学科的研究成果，协同学是研究激

光的成果，但普里高津和哈肯都敏锐地认识到它们的普适意义，经他们本人及其学派，再加上整个系统科学界的努力，早先的自组织理论，已发展为“系统自组织理论”了。

(六) 洛伦茨, E. N.

洛伦兹 (Edward Norton Lorenz, 1917—) 美国气象学家 (如图 2—19)。1917 年 5 月 23 日生于美国康涅狄格州。1943 年获麻省理工学院理科硕士, 1948 年获理学博士。后任职该校, 1962 年起任教授。1976 年被选为美国科学院院士。



图 2—19

洛伦茨主要研究大气环流和天气预报。1955 年他利用有效位能 (见大气能量) 概念讨论了大气环流维持的机理。1963 年发表的《确定性的非周期流》一文, 首先从确定的方程 (后被称为洛伦茨方程) 中计算模拟出非周期现象, 从而提出用逐步延伸方法从事长期天气预报是不可能的观点。该文也被认为是研究非线性混沌问题的第一篇论文。1963 年以后, 系统研究数值天气预报“可预报性的极限”的理论和实际问题。1967 年出版的《大气环流的性质和理论》一书, 精辟地阐述了大气环流研究工作的历史发展、现状和展望。

由于他对大气环流动力学有独特和革新的见解以及研究天气预报“可预测性”问题的成果, 多次获得名誉学位和奖励。1963 年获美国气象学会迈辛格奖, 1969 年获美国气象学会罗斯比研究奖章, 1973 年获英国皇家气象学会西蒙斯纪念金质奖章, 1983 年获瑞典皇家科学院克拉福德奖。洛伦茨的主要论著还有:《动力学方程的最大简化》(1960)、《振荡力学》(1963)、《大气环流的低阶模式》(1980)、《用大的数值模式进行大气可预测性试验》(1983) 等。

1963 年, 洛伦兹创立了大气对流数学模型, 运用计算机对天气变化进行了数值模拟, 结果很清楚地看到了数值上千分之一的误差导出了完全不同的天气模式。对于这个情况, 洛伦兹用“蝴蝶效应理论”来加以形象化地说明: 一只南美洲亚马逊河流域热带雨林中的蝴蝶, 偶尔扇动几下翅膀, 可能两周后在美国德克萨斯引起一场龙卷风。其原因在于: 蝴蝶翅膀的运动, 导致其身边的空气系统发生变化, 并引起微弱气流的产生, 而微弱气流的产生又会引起它四周空气或其他系统产生相应的变化, 由此引起连锁反映, 最终导致其他系统的极大变化。对初始条件的敏感性, 说明了系统的不确定性与不可预测性, 即系统的非线性。

(七) 费根鲍姆

费根鲍姆 (Mitchell Jay Feigenbaum), 1944 年 12 月 19 日出生于美国费城 (如图 2—20)。他是一个数学物理学家, 他在混沌理论上所做的开创性研究导致了费根鲍姆常数的发现。作为一个波兰和乌克兰移民的儿子, 费根鲍姆的教育并不愉快。尽管成绩很好, 但他在布鲁克林的中学教育和在纽约市的大学教育似乎都不对他的胃口。1964 年, 他在马萨诸塞州工业学院开始了自己的研究生课程。他没有学习电机工程, 而是改学了物理。后来他到美国 Los Alamos 实验室研究湍流。这项研究将费根鲍姆引进了混沌理论的殿堂。



图 2—20

20 世纪 70 年代, 美国普林斯顿大学的生态学家罗伯特·梅 (Robert May) 开始利用计算机对单一群体生物随时间而变化的最简单的生态学方程进行系统的研究。他对这一非线性参数试用不同的值进行迭代计算。他发现, 改变的不仅仅是输出的数量, 而且也改变了输出的性质; 因为它不仅影响着平衡时群体的数值, 而且还影响群体是否能够实现平衡。梅编制了计算机程序, 慢慢增加 k 值, 对方程进行数值运算。图像显示, 周期区内分叉序列中两个相邻分叉点之间的距离越来越快地缩短, 而且似乎有某种规则的比例关系。

费根鲍姆敏锐地觉察到了这种几何收敛的周期僵化级联现象的规则性, 对收敛的速度——标度比的值进行了深入的探讨。1975—1976 年, 费根鲍姆在一次会议上听到斯梅尔关于逻辑斯蒂映射及其通过周期倍化级联走向混沌的介绍后, 投入到对逻辑斯蒂映射的研究。那个时代, 使用计算机是件麻烦冗长的过程, 要用穿孔卡分批输入数据, 几天后才能出结果。所以费根鲍姆宁肯用惠普 HP65 型可编程计算器, 这是一个幸运的选择。因为计算器算得很慢, 促使操作者在结果出来以前常去思考它。为了节省时间, 费根鲍姆就尝试大致揣测级联中的下一个分叉点可能在哪里。不久他就发现了规律, 相继的分叉点之差具有恒定的比率, 前一个差值约为后一个差值的 4 倍, 更精确地说, 这二者的比率约为 4.669。对一个物理学家来说, 恒定比率意味着标度率, 表明物理学特征必在愈来愈小的标度上再现, 这当然是极为重要的。费根鲍姆用此方法对另一个映射即三角映射 $x \rightarrow k \sin(x)$ 进行了计算, 同样发现了周期倍化级联和几何收敛现象, 更为惊人的是它的标度比值也是 4.669。

费根鲍姆的发现，是一条普遍适用于一切从有序转变到混沌的动力系统在转变点上的自然规律。这种普适性不仅是结构的，而且是测度的。这一发现的意义在于，动力系统中存在着标度变换，它不仅控制着分叉花样，而且延伸到精确数值。事物整体具有与其部分相似的结构，说明在完全确定的系统中不需要引入任何干扰，就可能出现不规则的随机运动，这是一种内禀特性。费根鲍姆的卓越贡献在于他看到并指出了普适性，真正地用标度变换进行计算，使混沌学的研究从此进入蓬勃发展的阶段。

(八) 霍兰

约翰·H·霍兰，遗传算法的发明人。他是密歇根大学计算机科学与电子工程教授兼心理学教授，著名的麦克阿瑟研究奖获得者，圣菲研究所指导委员会主席之一。著有《自然系统和人工系统中的适应》、《涌现》、《隐秩序》等书。

复杂适应系统（Complex Adaptive System，简称CAS）理论是霍兰研究的重点。CAS理论的核心思想是，适应性造就复杂性。霍兰在《隐秩序》一书的序言中开宗明义地指出，本书讨论的中心议题，是近来备受关注的—个领域：复杂性。在写这本书的过程中，我把重点放在复杂性的—个侧面，“复杂适应系统”的研究。正因如此，霍兰把“适应性造就复杂性”作为《隐秩序》—书的附标题，突出了其CAS理论的核心思想。

既然适应性造就复杂性，在复杂适应系统中“适应性”自然是一个核心概念。霍兰将生物学中适应性术语的范围扩大，把学习与相关过程也包括进来。尽管不同的CAS过程具有不同的时间尺度，但适应的概念可以应用于所有的CAS主体。所谓适应，就是个体与环境之间的主动的、反复的交互作用。任何系统包括CAS都是由大量元素组成的。霍兰认为它们应该是主动的元素（active element），于是借用了经济学中的主体（agent）—词。从元素到主体，并不仅仅是一个简单的名称变换，而是在观念上有明显的突破性。主体概念加上适应性概念成为“适应性主体”或“行为主体”，把组成CAS的个体的主动性提高到了复杂性产生的机制和复杂系统进化的基本动因的重要位置。在CAS中，任何特定的适应性主体所处环境的主要部分，都由其他适应性主体组成，所以任何主体在适应上所做的努力，就是要去适应别的适应性主体。因此，主体与主体之间的相互作用、相互适应成为CAS复杂动态模式



图 2—21

的主要根源。

复杂适应系统（CAS）理论的提出对于人们认识、理解、控制、管理复杂系统提供了新的思路。CAS 理论包括微观和宏观两个方面。在微观方面，CAS 理论的最基本的概念是具有适应能力的、主动的个体，简称主体。这种主体在与环境的交互作用中遵循一般的刺激——反应模型，所谓适应能力表现在它能够根据行为的效果修改自己的行为规则，以便更好地在客观环境中生存。在宏观方面，由这样的主体组成的系统，将在主体之间以及主体与环境的相互作用中发展，表现出宏观系统中的分化、涌现等种种复杂的演化过程。CAS 理论虽然提出不久，但是由于其思想的新颖和富有启发，它已经在许多领域得到了应用，推动着人们对复杂系统的行为规律进行深入研究。

三、现代系统科学主要学派介绍

（一）圣菲研究所（SFI）

圣菲研究所成立于 1984 年。它是一个独立的、非营利的研究所，靠申请各种基金来支持跨学科的研究工作。不久前，它被评为全美国最优秀的五个研究所之一，与具有上百年历史的贝尔实验等并列在一起。是什么原因使这个成立仅十几年的，规模不大的，处于偏僻的新墨西哥州的研究所，具有如此巨大的声望和吸引力呢？这不能不说是系统科学和复杂性研究的魅力所在。正是这个特色使它具有了与众不同的生命力和吸引力，在短短的十几年内成长为举世瞩目的复杂性研究的中心。

圣菲研究所的发起者和第一任所长，乔治·考温（George Cowan）是一位具有广阔视野和远见卓识的科学家。他曾长期担任洛斯阿拉莫斯（美国核武器研究基地）的技术与组织工作，具有丰富的理论知识和实践经验。当他退休的时候，多年的思考促使他萌发了这样一个创意：建立一个冲破学科界限的、独立的研究所，探讨各学科共同关心的，“人类究竟是如何认识和处理复杂性的”这个难题。这个想法的出现不是偶然的。考温在几十年的科学生涯中，深深地体会到近代科学中片面强调还原论思想的弊病，如学科分隔造成的隔膜，综合的整体观念的缺乏，只见树木不见树林的短视和偏见，在丰富的实践面前的僵化和无能。他认为，这些弊病不仅阻碍了科学的发展，而且往往是人类面临的许多现实问题难以得到有效解决之原因所在。因此，他利用自己多年工作中建立的、在科学界的广泛联系，把这种想法广为宣传。

在许多著名科学家的支持下，第一次研讨会于 1984 年，在美国新墨西哥

城的首府圣菲市举行。这次会议以经济为主题，参加者不但有以诺贝尔经济学奖得主肯尼思·阿罗（Kenneth Arrow）为首的许多经济学家，而且有许多物理学家，包括诺贝尔物理学奖得主马瑞·盖尔曼（Murray Gell-Mann）和菲利普·安德森（Philip W. Anderson）。这次成功的交流使得与会者十分兴奋，并且一致同意按此方向走下去。这就是圣菲研究所的诞生。考温很自然地被推选为第一任所长。

以复杂性为研究的中心议题，是圣菲研究所的一大特色。在 20 世纪 80 年代中期，虽然已有不少学者提出并开始研究复杂性，但是还没有专门的机构从事这方面的工作。其主要原因之一是近代科学长期形成的学科分隔的局面，阻碍了科学家们的相互了解和交流。所谓隔行如隔山的情况越来越成为科学进步的障碍。资金分配，成果认定以致学术圈子的划定，都使得跨学科的研究工作举步维艰。一种冲破学科偏见的、和谐的合作氛围，一个不受各种传统体制束缚的交流场所，一套鼓励创新的运行机制，成为许多希望科学进步的学者所追求的理想。圣菲研究所的出现使人们见到了希望。

很快，圣菲研究所就吸引了一大批富有创新精神的，勇于探索这个新开辟领域的科学家。他们来自许多不同的传统学科。如，经济学家布赖恩·阿瑟（W. Brian Arthur），他在经济学界首先研究了现代经济的重要特征——收益递增现象；计算机科学家约翰·霍兰（John H. Holland），他是遗传法算法（Genetic Algorithm）的首创者；还有研究“人工生命”闻名的克里斯·朗顿（Chris Longdon），从医学领域来的斯图亚特·考夫曼（Stuart Kauffman），有复杂性研究多种早期著作的作者约翰·卡斯蒂（John Casti）等等。这些人来自不同的大学、研究机构，不同的国家。他们中既有德高望重的诺贝尔奖金得主（如阿罗、盖尔曼、安德森），也有初出茅庐，血气方刚的青年学者（朗顿当时还正在攻读博士学位）。在圣菲，年龄、专业、地位都已不再构成交流的障碍，所有人都为了创建一门新的学科而到这里来。这里不授学位，更没有终身职位，但是却具有如此巨大的吸引力。到八十年代末期，圣菲研究所已经成为复杂性研究的众所周知的中心。

进入 90 年代以来，圣菲研究所的工作进一步深入。以下几件事情具有特别重要的意义。首先，该研究所从 1994 年开始举办乌兰讲座。这是一个一年一度的讲座，用以展示复杂性研究的最新成果。斯坦尼斯拉夫·乌兰（Stanislaw Ulam）是一位出生于波兰的著名的数学家。他长期在洛斯阿拉莫斯工作。虽然在 1984 年圣菲研究所正在酝酿中的时候，他就去世了，但是他的思想对于圣菲研究所的影响是十分巨大的。他的夫人把他的藏书捐赠给了研究所。为

了纪念他，圣菲研究所设立了乌兰讲座。它已成为世界瞩目的、关于复杂性研究的前沿阵地。

另一件影响深远的事情是，公用的、为建立复杂系统计算机模拟模型而设计的软件平台 Swarm 的开发和推广。计算机在圣菲研究所的工作中发挥着十分重要的作用。许多想法需要在计算机上进行验证，同时，计算机模拟又往往能提供有益的启发。正如有的专家指出的：“计算机是系统科学的实验室。”圣菲研究所针对各种课题的共同需求，开发了一个名为 Swarm 的软件平台，为各种模拟工作提供了方便易用的手段和环境。作为共同研究的基础，这个软件平台已经为圣菲研究所内外的许多研究项目所利用。据圣菲研究所的网站介绍，世界上已有几十个大学与研究所安装了 Swarm 平台。由于它的源程序是公开的，各国研究人员都可以对它进行修改与扩充，从而使它的内容得到不断丰富和发展。

圣菲研究所非常重视人才培养，它把扩散和普及系统科学的思想作为自己最重要的任务之一，尤其是向下一代科学家的宣传与普及。它的夏季学校 (Summer School) 是一项非常具有特色的活动，到 2000 年，已经举办了十二期。这种学校每年暑假举办一次，为期四周，讲课的教授都是在系统科学方面最具权威、最有创新的著名专家，而对象则是研究生以致本科生。参加者不但能够直接聆听权威专家的讲课，而且通过做项目和写论文，直接参与科学研究。他们的目标很明确：培养面向 21 世纪的新一代的科学家。在这里，我们可以看到 21 世纪的、全新的现代科学的雏形。

此外，圣菲研究所还出版了许多出版物，除了已出版的几十种专著之外，它还出版了杂志《复杂性》(Complexity)。为了加快交流，圣菲研究所还编发内部交流的工作论文 (Working Papers)，每年有 100 篇左右，不但印成单份散发，而且放在网站上。这一措施大大加速了该领域的交流。

作为一个新兴的交叉学科，系统科学在传统的学科体系中常常不易得到发展的空间，有时甚至不得不为生存而斗争。圣菲研究所的创新之处就在于它为系统科学的发展创造了一个良好的环境，提供了发展的条件。

还需要说明的一点是，圣菲研究所十分重视理论与实际的有机结合。从性质上来说，圣菲研究所是以基础理论研究为主的、非营利的研究机构，各种基金会的支持也往往不与直接的经济效益挂钩。然而，千万不要因此而形成误解，以为圣菲研究所的工作只是象牙塔中的计算游戏。事实上，圣菲研究所的研究课题几乎都有十分现实的背景，与重要的现实问题相联系。人数最多的课题组是经济课题，这显然是与近 20 年来世界经济体系的深刻变革相联系的。

此外,关于免疫系统的研究、关于生态与环境系统的研究、关于社会变迁的研究、关于生命起源的研究,都和当今人类的许多迫切的、现实的问题相联系。通过开放的、灵活的各种方式,圣菲研究所和世界许多大学、研究机构以及企业建立了广泛的联系和合作。这使得它与整个人类社会的发展与进步息息相关,确实做到了理论联系实际。

(二) 国际应用系统分析学会 (IIASA) 和法国莫兰学派

1972年,IIASA作为一个连接以前苏联为代表的东方和以美国为代表的西方两大阵营的桥梁而成立。奥地利政府以一个先令的租金将维也纳市郊的一座皇宫租给了IIASA,直至今日。IIASA的发展经过了4个阶段。第一个10年侧重于发现和提高系统分析方法对所有社会面对的复杂问题的应用,使其成为世界复杂性研究的领导者,一个重要代表作是《Energy in a Finite World》,此书对全球长期能源做出预测。第二个10年更多地转向环境领域,建立了区域酸雨模型(RAINS)。第三个10年正值冷战结束,IIASA进行了战略性调整,重新确定了三大研究主题:全球环境变化;全球经济及技术转型;分析全球问题的系统方法。期间成功的研究有东欧经济转型、全球人口分析预测、土地利用等。IIASA的发展进入了刚刚开始第四个10年,中国的加入标志着IIASA正式从东西方桥梁转变为全球及南北问题的研究中心。现在的三大研究主题为:能源与技术,环境与自然资源,人口与社会。

埃德加·莫兰(Edgar Morin)是法国当代著名的哲学家、社会学家、人类学家和社会评论家。他1921年生于巴黎,是犹太裔。1942年毕业于法国图卢兹大学史地和法学专业。从1950年起他在法国国家科学研究中心(相当于法国科学院)从事研究工作。在1973—1989年任该中心所属的“社会学、人类学、政治学多学科研究中心”主任,现为荣誉研究员。莫兰著作甚丰,在法国社会影响很大。

莫兰思想的核心部分就是他提出的“复杂方法”论,或称“复杂范式”。这个理论批判了仍占统治地位的经典科学的研究方法的两大弊病:一是化简,即把复杂事物化归为简单事物,如把人类学问题化为生物学问题,把生物学问题化归为物理—化学问题;二是割裂,即如果确定了不同层次的对象性质区别,就使它们截然分割、不相连属,如人类学问题、生物学问题、物理—化学问题彼此隔绝、不相影响。莫兰的思想水准实际上已经超越了原有的一般系统论的原理,因而复杂方法论可以说代表着西方的科学方法论在系统论思潮后的一个新发展。这从以下两个方面表现出来。

1. 原有的一般系统论强调世界事物的整体性,提出“整体大于部分之和”

的原则。莫兰认为这反映了系统性质的一方面，他又提出了“整体小于部分之和”的原则，补充了对于作为局部的个体的重要性的认识。因此莫兰复杂方法既反对只见部分的还原主义，也反对只见总体的整体主义，而表现为二者的结合。在当前世界化的潮流中奉行这一方针有助于形成全球文化的有机而又丰富多彩的面貌。

2. 原有的系统论如经典科学一味强调世界本质的有序性的方面，而把无序性作为表面现象加以忽略。莫兰根据当代科学的最新研究成果提出无序性和有序性共同构成世界的本质。无序性会引起事物的衰退和干扰人类行动计划的实行，但是也会引起新事物的产生和给人类实践行动提供罕见的有利机遇。它表现为偶然性、随机性，因此不能仅靠理性推理来掌握，还要借助实践直觉。在当今世界上人们普遍利用预制的“程序”来进行实践活动时，莫兰强调指出人类最基本的行为方式还是“战略”或“策略”。后者包含着对世界事物发展中的无序性因素的正视、反抗和利用。

莫兰的丰富著作已被许多国家翻译出版，因此他的思想产生了广泛的国际性影响。联合国教科文组织的《信使》月刊 1996 年 2 月号（中文版为该年 5 月号）曾作为“复杂思想”专号。我国近年来也开始翻译莫兰的著作，已出版了《地球——祖国》（马胜利译，三联 1997 年版），《迷失的范式：人性研究》（陈一壮译，北大出版社 1999 年版），台湾还出版了他的《复杂思想导论》。莫兰的思想具有独特性，特别是他致力于批判现代西方思想方法的局限性和西方社会的“文明病”，在我国现代化建设的进程中是有参考价值的。

（三）我国系统科学的发展

系统科学在我国的研究应用，早期是从推广应用运筹学开始的。运筹学在我国的发展始于 1955 年。1956 年在中国科学院力学研究所建立了我国第一个运筹学研究组；1960 年底，中国科学院力学研究所与中国科学院数学研究所的两个运筹学研究室合并成为数学研究所的运筹学研究室。华罗庚从 60 年代初期起在我国大力推广“统筹法”，取得显著成就；在这同时，随着国防尖端技术科研工作的发展，我国在工程系统的总体设计组织方面也取得了丰富的实践经验。1978 年 9 月，钱学森、许国志、王寿云发表了“组织管理的技术——系统工程”，提出了利用系统思想把运筹学和管理科学统一起来的见解，迅速产生了强烈的反响，这是在我国推广应用系统工程出现了新局面的标志。

随着系统工程在社会、经济、科学技术各个方面广泛开展研究应用，系统理论方面的基础研究也有长足的发展。其中最值得关注的是钱学森于 1986 年开创的“系统学讨论班”。这个班的研讨活动，提炼了许多重要概念，总结和

提出了系统研究方法，逐步形成了以简单系统、简单巨系统、复杂巨系统（包括社会系统）为主线的系统学（systematology）提纲和内容，明确系统学是研究系统结构与功能（包括演化、协同与控制）一般规律的科学。这个班的活动为系统科学在我国的发展，为系统科学的建立做出了重要的基础性的贡献。

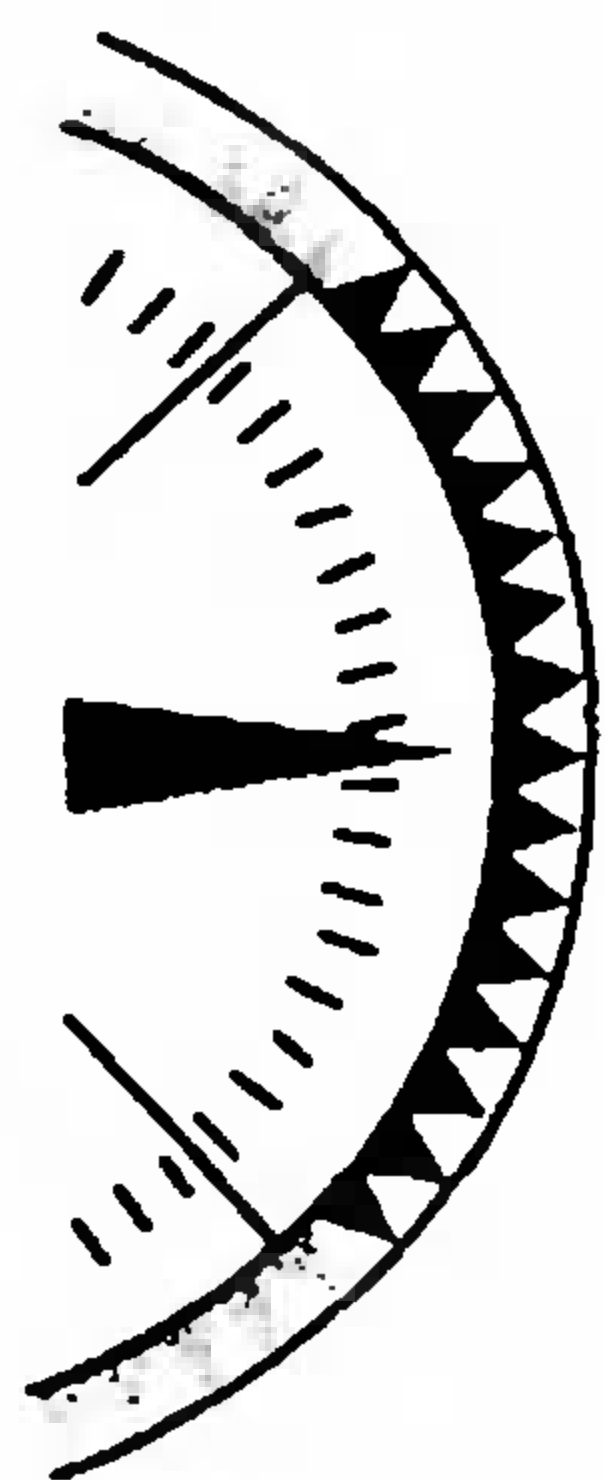
80年代中期，差不多与美国圣菲研究所开展复杂性研究的同时，在钱学森的指导和参与下，我国对社会经济系统等复杂系统进行了研究，提炼与总结出开放的复杂巨系统概念，以及处理这类系统的方法论，即从定性到定量的综合集成法，并于1990年初正式发表了“一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论”。我国经过十多年的努力，开始在研究的前沿提出自己独创性的理论。这是我国开展系统科学与系统工程研究与应用的里程碑，在国际上也是前瞻性的成果。

关键词

系统 演化 层次 整体观 还原论 自然辩证法 混沌
蝴蝶效应 复杂性

复习题

1. 简述系统思维的基本观点。
2. 列举一两个你所熟悉的古代思想家，对他们的观点做出评价。
3. 探讨近代系统科学对系统观念偏离的原因。
4. 简要回顾现代系统科学的发展历程及标志性事件。
5. 谈谈自己对复杂性的认识。



第三章

系统科学的内容和范围

内容提要

系统科学以信息论、控制论、系统工程、一般系统论，以及随后发展起来的耗散结构理论、协同学、系统结构的突变理论等为内容，是在这些学科相互交融、相互促进、共同延伸的基础上形成和发展起来的。系统科学的形成和发展，是科学发展史上的革命，它有着鲜明的特点，具有重大的意义。

系统科学作为一门科学有它产生、发展、形成的过程；它把事物看做系统，从系统结构和功能及系统的演化，研究各学科（从物理系统、化学系统、生物系统到经济系统和社会系统）的共性规律，是各门学科的方法论和基础。而且由于系统科学是一门横断科学，比一般的交叉学科如生物、物理等涵盖的范围更宽。它涉及的自然科学包括数学、物理学、化学等多个学科领域，还涉及工程技术的多个部门，甚至与社会科学的不少学科也有联系。因此，自古以来，各家各派对系统科学的看法和定义是不一样的，对系统科学研究的范围与内容也都有自己的一套体系结构，本章将主要针对近年来在系统科学及相关领域研究的比较深入和成熟的部分做一些概要的介绍。

第一节 复杂系统状态的表达方式

一、系统定义、层次、分类

(一) 系统定义

系统科学研究的对象被称为系统，很多事物可以被看成是系统，仅就系统自身的规定性看，按照现代系统科学的开创者贝塔朗非的定义，系统是“相互作用的多元素的复合体”。如果把这个定义稍加精确化，就可以表述为：如果一个对象集合中至少有两个可以区分的对象，所有对象按照可以辨认的特有方式相互联系在一起，就称该集合为一个系统。集合中包含的对象称为系统的组成部分，最小的即不需要再细分的组成部分称为系统的元素或要素。系统科学是一门基础学科，为研究方便，我们也可以将系统定义为：由一些元素（子系统、部件）通过相互作用、相互关联、相互制约，组成的具有一定功能的整体。

通过以上两种定义，我们可以看出：系统的第一个特点是多元性，系统是多样性的统一、差异性的统一。存在有差别的多个事物，才可能在一定条件下出现整合成为一个系统的要求。系统的第二个特点是相关性，系统中不存在与其他元素无关的孤立元素或组成部分，所有元素或组成部分都按照该系统特有的、足以与别的系统相区别的方式彼此关联在一起，相互依存、相互作用、相互关联、相互制约。系统元素必须具有内在相关性，这种相关性也是系统“生命力”的重要源泉，差异而不相关的事物构不成系统。以上两个特点又决定了系统的另一个更重要的特点：整体性。系统是由它的所有组成部分构成的统一整体，具有整体的结构、整体的特性、整体的状态、整体的行为、整体的功能等。系统是整合起来的多样性，兼具多样性和统一性两个特点。此外，我们在理解系统定义时还要注意以下两个问题。

1. 系统和环境的关系

我们将所研究的对象定义为系统，而将与之有联系的、我们不关心的部分定义为环境，客观世界是统一的，我们研究问题时把客观世界分成系统与环境两部分，这只是一种研究方法。系统与环境是相对的，研究这个问题时我们规定它为系统，在研究另一问题时就可能规定它为环境，这可以看成是系统划分的相对性。在不同的问题中可以选择不同的系统，但是在研究同一个问题的过

程中，我们不能任意改变系统的划分而要坚持一种系统划分的标准。

某一对象放在系统内与放在系统外，它们的区别在什么地方呢？对于系统，我们要描述它的状态，关心它的演化，找出系统演化与其他因素的关系；对环境我们不关心它的组成、性质等各种情况，不关心其变化，其状态认为是已知的。从相互关系来讲，我们只讨论环境对系统的影响，仅了解它对系统的作用就可以了，并且这种作用被认为是已知的；而系统对环境的影响则是我们不关心的。根据此点认识在建立模型时，我们经常把不关心其演化的部分划在系统外作为环境，以使我们对问题的讨论可以更集中，且往往把不好讨论的问题也作为环境划在系统之外，以使问题简单可解。

2. 系统科学讨论系统主要通过建立系统演化的数学模型来进行分析

在建立数学模型时更关心的是系统内子系统之间的相互关系，对于组成系统的具体物理内容并不关心。因此，即使是物理内容完全不同的系统，只要其演化时相互作用关系的表达式一样，就认为它们是同一类的系统，并用统一的模型来表示它们。

(二) 系统的层次

系统科学把整体具有的、部分不具有的特性称为整体涌现性。对于这种涌现性的另一种解释是高层次具有而低层次没有的特性。复杂系统不可能一次完成从元素性质到系统整体性质的涌现，需要通过一系列的中间等级的整合逐步涌现出来，每个涌现等级代表一个层次，每经过一次涌现形成一个新的层次，从元素层次开始，由低层次到高层次逐步整合、发展，最终形成系统的整体层次。层次是系统由元素整合为整体过程中的涌现等级，不同性质的涌现形成不同的层次，不同层次表现不同质的涌现性。

出现新的涌现性不一定产生新的层次。由相同元素组成的系统在内外因素作用下改变了结构，必然丧失原结构对应的涌现性，出现由新结构决定的另一种涌现性，却没有形成新的层次。只有当某个已经形成的层次上出现了大量系统，以它们为子系统作进一步的整合而形成新的更高级的系统时，才会涌现出新的层次。

层次是系统科学的基本概念之一，是认识系统结构的重要工具，层次分析是结构分析的重要方面。

(三) 系统的分类

撇开组成部分的具体基质，仅仅把对象看做系统，主要是从以下方面来区分不同的系统：

1. 按照系统规模划分，有小系统、大系统、巨系统三类；

2. 按照系统结构简单与否划分, 有简单系统和复杂系统两类。一般来说, 小系统和大系统都属于简单系统, 巨系统可能是简单的, 也可能是复杂的。

3. 按照研究问题的方法, 按系统、子系统之间的相互作用特点进行分类, 我们又可以把系统作如下分类:

- (1) 按是否有人参与系统的形成, 分为两类: 自然系统和人造系统;
- (2) 按系统与环境的关系, 分为三类: 孤立系统、开放系统、封闭系统;
- (3) 按系统内子系统之间的相互关系, 分为两类: 线性系统、非线性系统;
- (4) 按系统的状态与时间的关系, 分为两类: 静态系统和动态系统;
- (5) 按系统演化规律的特点, 分为两类: 确定性系统和随机系统。

二、系统的状态和演化

(一) 状态变量

研究系统状态, 分析系统演化特性都要依赖描写系统状态的状态变量, 状态变量是指描述系统每时每处情况的一组随时间变化的量。它可以取不同的数值。最简单的是可以用一个状态变量描述的系统, 一般系统需要同时用若干状态变量来描述。给定状态变量的一组数值就是给定一个系统状态, 不同组的数值代表系统的不同状态。例如, 给定一组 T (温度)、 p (压强)、 V (体积) 就是给定理想气体系统的一个状态。一般来说, 状态变量的选择应满足以下要求: (1) 完备性, 状态变量足够多, 能够全面刻画系统状态; (2) 独立性, 任一状态变量都不能表示为其他状态变量的函数。

无论是静态系统还是动态系统, 基本课题是在状态空间中研究系统的状态转移。静态系统是基于这样一个假设而对系统的简化描述: 在状态空间中从一个状态向另一个状态的转移无需耗费时间, 可以瞬间完成。动态系统的特点是, 在状态空间中从一个状态向另一个状态的转移不可能瞬间完成, 必须耗费一定的时间, 即呈现出状态随时间变化的特征。

(二) 系统的演化

系统的结构、状态、特性、行为、功能等随着时间的推移而发生的变化, 称为系统的演化。演化性是系统的普遍特性。

系统演化有两种基本方式。狭义的演化仅指系统由一种结构或形态向另一种结构或形态的转变。广义的演化包括系统从无到有的形成, 从不成熟到成熟的发育, 从一个结构或形态到另一种结构或形态的转变, 系统的老化或退化, 从有到无的消亡等。系统演化的动力有来自系统内部的, 即系统组成部分之间

的合作、竞争、矛盾等，导致系统规模改变，特别是组成部分相互作用方式的改变，会进而引起系统功能及其他特性的改变。系统演化的动力也有来自外部环境的，环境的变化及环境与系统相互联系和作用方式的变化，都会在不同程度上导致系统内部发生变化，包括系统组成部分的特性、结构方式的改变等等。一般来说，系统是在内部动力和外部动力的双重推动下演化的。

系统演化有两种基本方向，一种是由低级到高级、由简单到复杂的进化，另一种是由高级到低级、由复杂到简单的退化。现实世界的系统既有进化，也有退化。两种演化又是互补的。系统进化的总方向是越来越复杂，从简单系统进化到复杂系统，关键是潜在的中间稳定形态的数目和分布。先产生稳定的中间形态，再逐步产生更复杂的形态，是实现可能性最大的进化方式。

三、状态空间

由系统所有状态构成的集合，称为系统的状态空间。空间的每个点称为状态点。设系统有 n 个独立的状态变量，记作 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。以状态变量为轴支撑起来的几何空间，就是系统的状态空间。状态变量的每一组具体数值 $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 代表系统的一个具体的状态。 N 是状态空间的维数，可以取任何的正整数。维数是决定系统行为特性的重要参数。在状态空间描述系统，由于能够区分不同的维数，可以建立系统的演化方程，确定不同类型的状态，描述系统的状态转移规律。

状态空间是在控制参量给定的条件下建立的。但控制参量也是可变的，这种变化有时只会引起系统行为特性的某些量变，有时可能导致系统定性性质的改变，因而必须是深入研究的重大问题。

我们在状态空间里通过建立一套完整的指标体系来研究系统的状态，实现了从定性分析到定量分析的一种转变，体现了科学的定量的系统思想。

四、吸引子和奇异吸引子

在状态空间描述系统演化要用到吸引子理论。吸引子代表系统的稳定定态。在状态空间中是用点来表示系统状态，用点集来表示系统演化的过程。吸引子有吸引作用，系统运动只有达到吸引子上才能稳定下来并保持下去。如果把状态空间的一般状态比做落在大地表面上的雨水，则江河湖海就是吸引子，雨水只有流入江河湖海，才能稳定下来。吸引子就是系统行为的最后归宿，亦即最后被吸引到的住所。

经典动力学理论告诉我们有三种类型的吸引子。一种是稳定不动点，代表系统的稳定平衡态。图 3—1 给出了状态平面上的两种稳定不动点吸引子，左边是稳定焦点，右边是稳定结点。

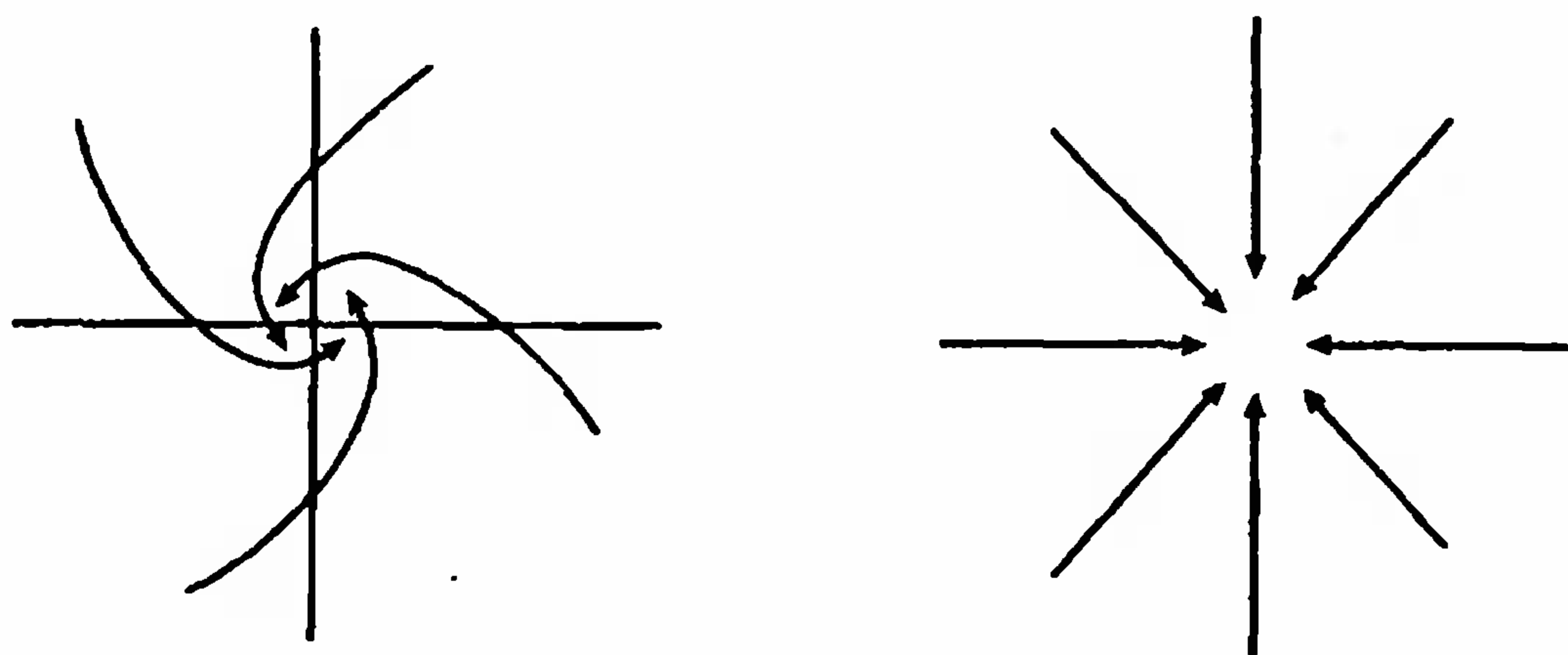


图 3—1 稳定不动点

另一种是稳定的极限环，代表状态空间的一条粉笔轨线，外面的轨道向里卷，里面的轨道向外卷，它们都以此封闭曲线为极限状态。极限环代表一种周期运动。图 3—2 左边是平面极限环，右边是空间极限环。

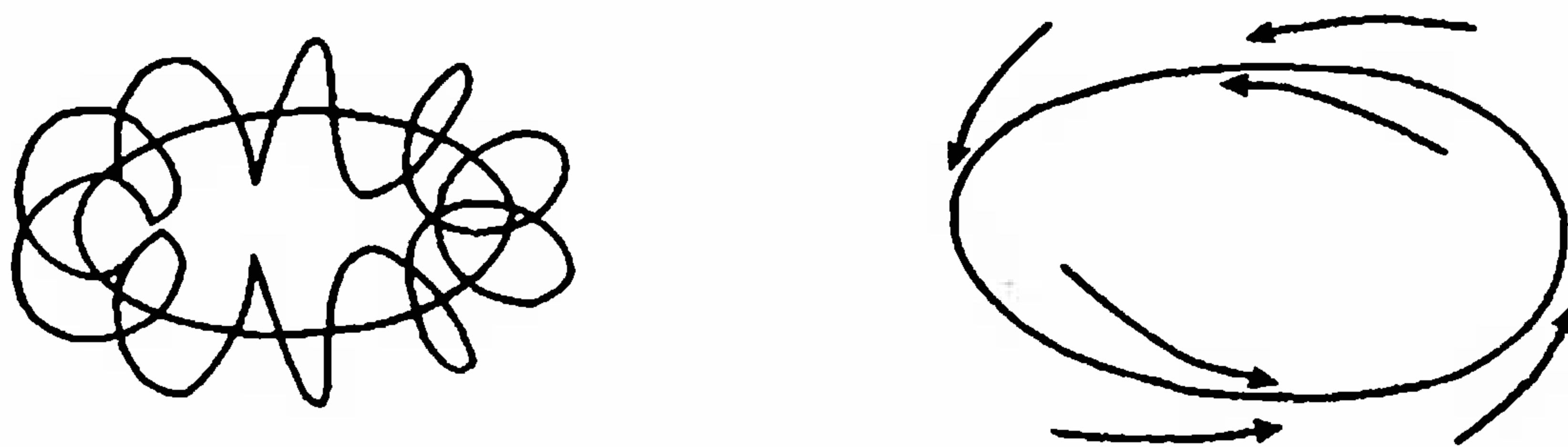


图 3—2 稳定的极限环

第三类吸引子是稳定环面代表的准周期运动。最简单的是三维状态空间的二维环面，在更高维的空间中，还可以出现高于三维的环面所描述的吸引子。

这三类吸引子都表现为规则的有序运动，混沌学文献称之为有序吸引子或平常吸引子。人们早已了解这类吸引子有两个基本的特征。一是稳定性，代表稳定定态，运动一旦到达吸引子就不再离开它，当小的扰动使系统暂时离开吸引子后，一定会自行回到吸引子上。二是低维性，吸引子作为状态空间的点集合，其维数一定小于状态空间的维数。一维状态空间只能有不动点型的吸引子，因为它是零维的。二维状态空间可以有零维吸引子（不动点）和一维吸引子（极限环）。三维状态空间除了有上述两类吸引子外，还可以有二维吸引子，即二维环面。 n 维状态空间可以有从 0 维到 $(n-1)$ 维的吸引子。

但是，上述这几类吸引子都不能描述混沌运动。有耗散的混沌系统的长期行为也要稳定于状态空间的一个低维点集合上，系统运动到这个集合以后，不

可能再离开它。这是该集合的稳定性的一面，因为它是一种吸引子。但在这个集合内部，运动又是极不稳定的，与前述的各类吸引子均不同。更重要的区别是，混沌系统的这种吸引子（点集合）都是状态空间的分形几何体，具有分数维数，集合图像极为复杂。科学家茹勒和泰肯斯把他们称为奇异吸引子。由于奇异吸引子上的系统行为是典型的随机过程，有时也称为随机吸引子。这里简单介绍一个最著名的吸引子——洛伦兹吸引子。

洛伦兹（E. N. Lorenz）把一个描述大气运动的 7 阶偏微分方程经过展开、截断之后，简化为以下 3 阶非线性微分方程组。这是一个 3 维连续运动系统， x, y, z 为状态变量， δ, b, γ 为控制参量。洛伦兹在计算机上用数值模拟实验的方法发现，在适当的控制参量下，这个简单的确定性系统能够呈现混沌行为。在洛伦兹方程中，取控制参量 $\delta=10, b=8/3, \gamma=28$ ，进行数值计算，将定态结果标在 $oxyz$ 坐标空间，得到如图 3—3 所示的吸引子。

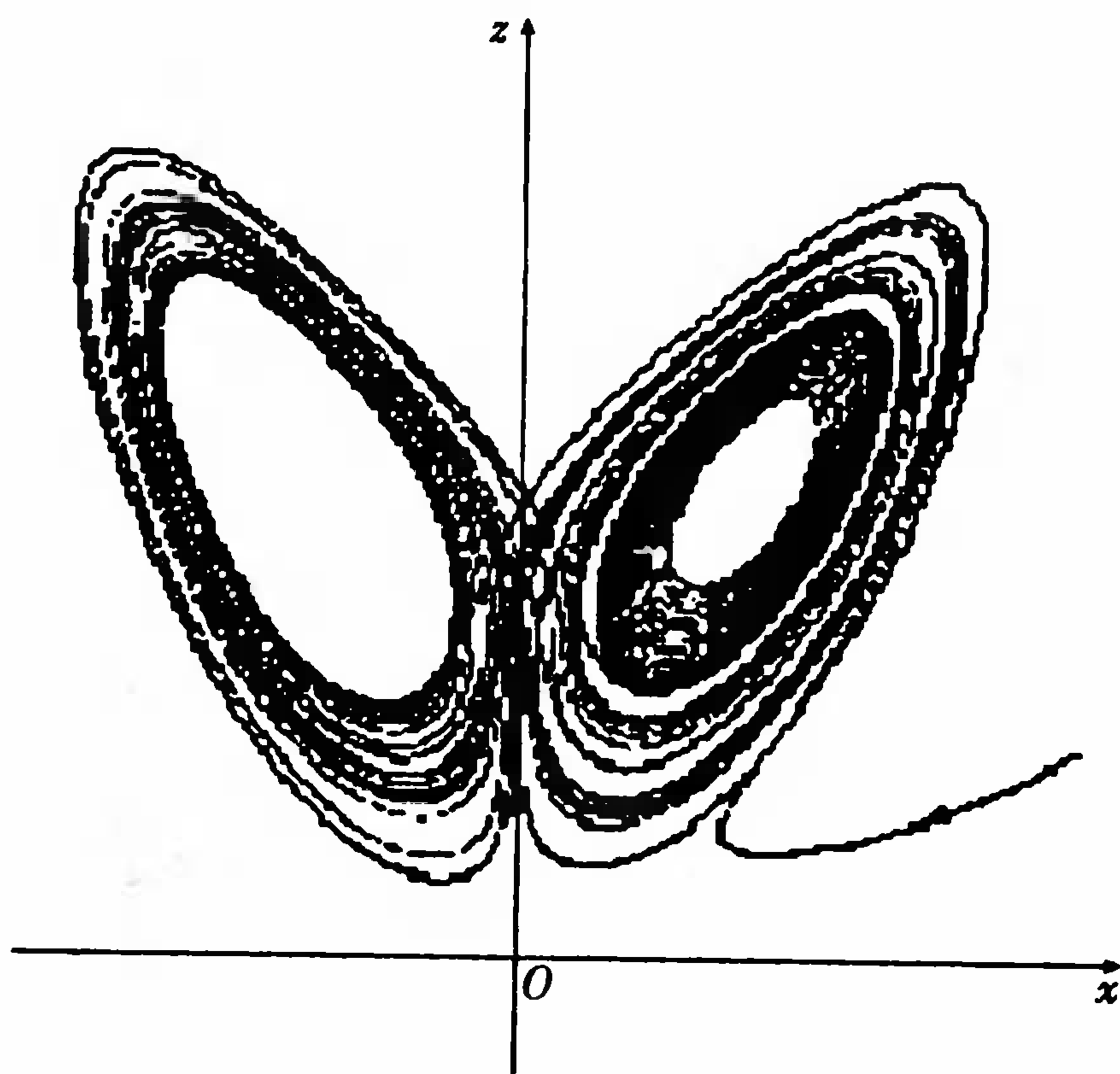


图 3—3 洛伦茨吸引子（在 xy 面上的投影）

洛伦兹方程：

$$\frac{dx}{dt} = -\sigma(x-y)$$

$$\frac{dy}{dt} = \gamma x - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - bz$$

这个魔术般的图形，有点像猫头鹰的面部，又像蝴蝶翅膀，已成为早期混沌研究者所用的徽记。它由两片构成，每片围绕着洛仑兹方程的一个不动点。运动轨道在其中一片上由外向内绕到中心附近，会突然跳到另一片的外沿由外向内绕行，然后又随机地跳回原来的那一片。它揭示出隐藏在无序的数据流中的精细结构。

第二节 分形和分数维的点集

一、什么是分形？

分形 (fractal) 一词是由分形理论的现代奠基人曼德尔·布罗特在 1975 年造出来的，这个词的拉丁词根含义是“破碎的、分裂的”。分形几何或分形理论研究的对象是那些很不规则而有自相似性的形状。所谓很不规则是指粗糙、不光滑、破碎、扭曲、缠绕等特性。典型的代表是海岸线的形状或者云彩、山峰、树页的形状。传统的欧几里德几何处理的是直线、由直线段组成的多边形、圆以及由不太复杂的函数定义的曲线。对于很不规则的形状，传统的几何学就难以处理了。典型的例子如“不列颠的海岸线有多长”。若以传统的方法测量，海岸线的长度将取决于所用量尺的长度。对较长的量尺，一些弯曲的细节就会被忽略，因而海岸线的长度就会较短；短的量尺可以量出一些细节，量出的海岸线就较长。如此推算下去，当量尺的长度很小时，由于海岸线的形状极其复杂，量得的长度就会变得极大。

分形是相对于整形而言的。传统几何学描述的对象是由直线或曲线、平面或曲面、平直体或曲体构成的各种几何形状，称为整形。整形的基本特征是具有光滑性即可微性（可切性），至少是分段或分片光滑的，除少数例外点或点集，形体都是可切（函数可微）的。分形的基本特征是不可微性、不可切性、不光滑性，甚至是不连续的。传统观点把自然界想象成各种规则形体的综合，但是普遍存在的集合对象大多数是分形，整形倒是一种例外。

从整体上看，分形几何图形是处处不规则的。例如，海岸线和山川形状，从远距离观察，其形状是极不规则的。在不同尺度上，图形的规则性又是相同的。海岸线和山川形状，从近距离观察，其局部形状又和整体形态相似，它们从整体到局部，都是自相似的。当然，也有一些分形几何图形，它们并不完全是自相似的。其中一些是用来描述一般随机现象的，还有一些是用来描述混沌

和非线性系统的。

二、典型的分形

现在介绍几种著名的数学分形，它们都是按严格的数学规则产生的，对于描述混沌运动有重要意义。

在一维背景空间的各种分形中，一个典型的例子是康托集合（也叫康托尘埃）。

我们设想一条单位长的直线线段，去掉它的中间的三分之一，这样留下的部分将是两段长度分别为三分之一的线段，总长度为 $2/3$ 。接下去我们再把这两条线段去掉中间的三分之一，这时留下的部分将是四条长度各为九分之一的线段，总长度为 $4/9$ 。如此不断地循环操作，最终将得到一个名为康托尔点集的集合。这就是一个分形图案。（见图 3—4）注意，它不是一个空集，在原线段的 $1/3, 2/3, 1/9, 2/9, 7/9, 8/9, \dots$ 处的点将永远留在这个点集中，然而留下部分的长度显然将趋近于零。读者不难验证刚才提到的三点性质在康托尔点集中都有体现。它是一个维数在 1 和 0 之间的分形图案。

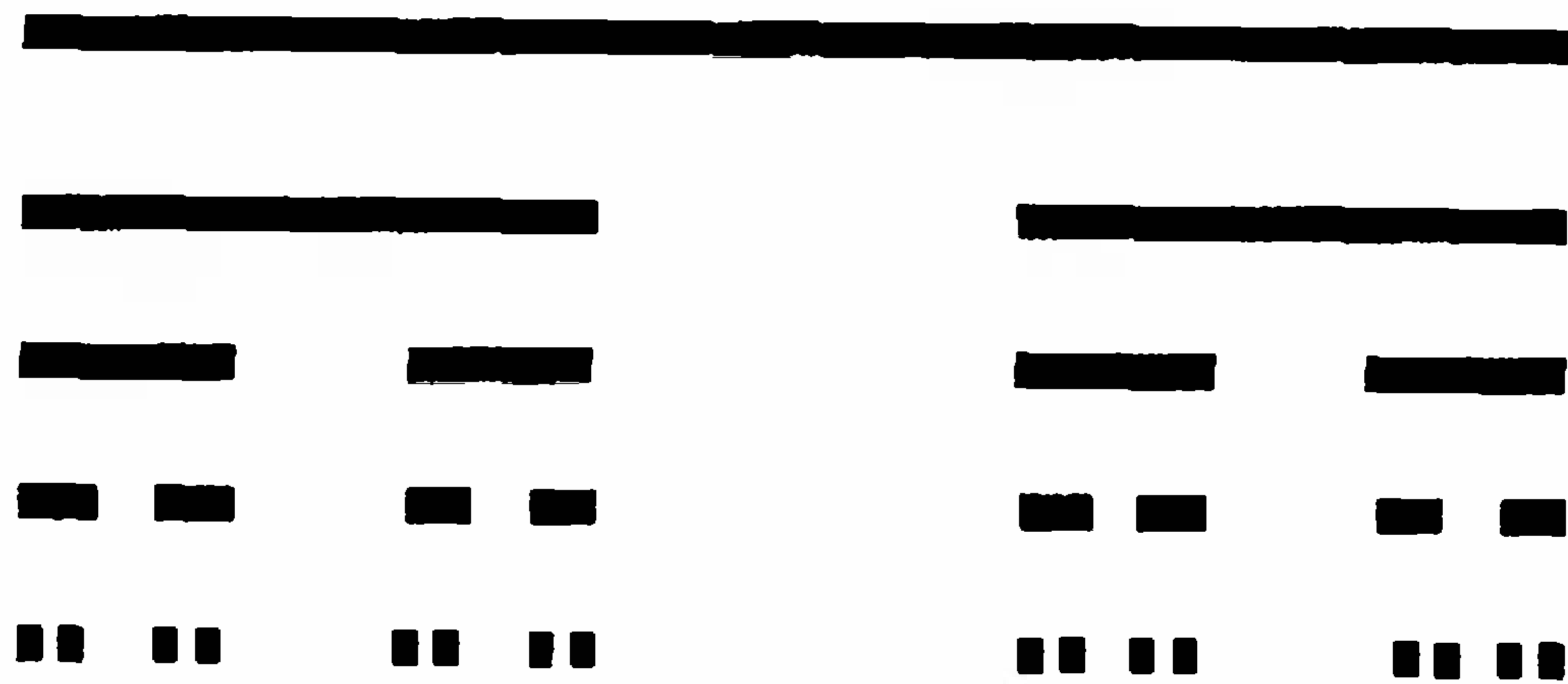


图 3—4 康托集合

再来看看二维背景空间中的典型例子。由瑞典数学家科和在 1904 年设计的一段曲线：同样从一条单位长的直线线段出发，以它的中间三分之一为底，画出一个等边三角形，并去掉这个底边。在这个变换中，线段的总长度将增加三分之一，成为 $4/3$ 。（如图 3—5 所示）继续这个变换，即对上一步所得图案中的每一条线段进行同样的处理，这时，曲线的总长度将按 $4/3$ 的 n 次方递增而趋于无穷大，然而它并没有铺满平面。这就是科和曲线，一种维数大于 1 而小于 2 的分形图案。细心的读者不难看出，其实它就是上面的海岸线问题的模拟与抽象。

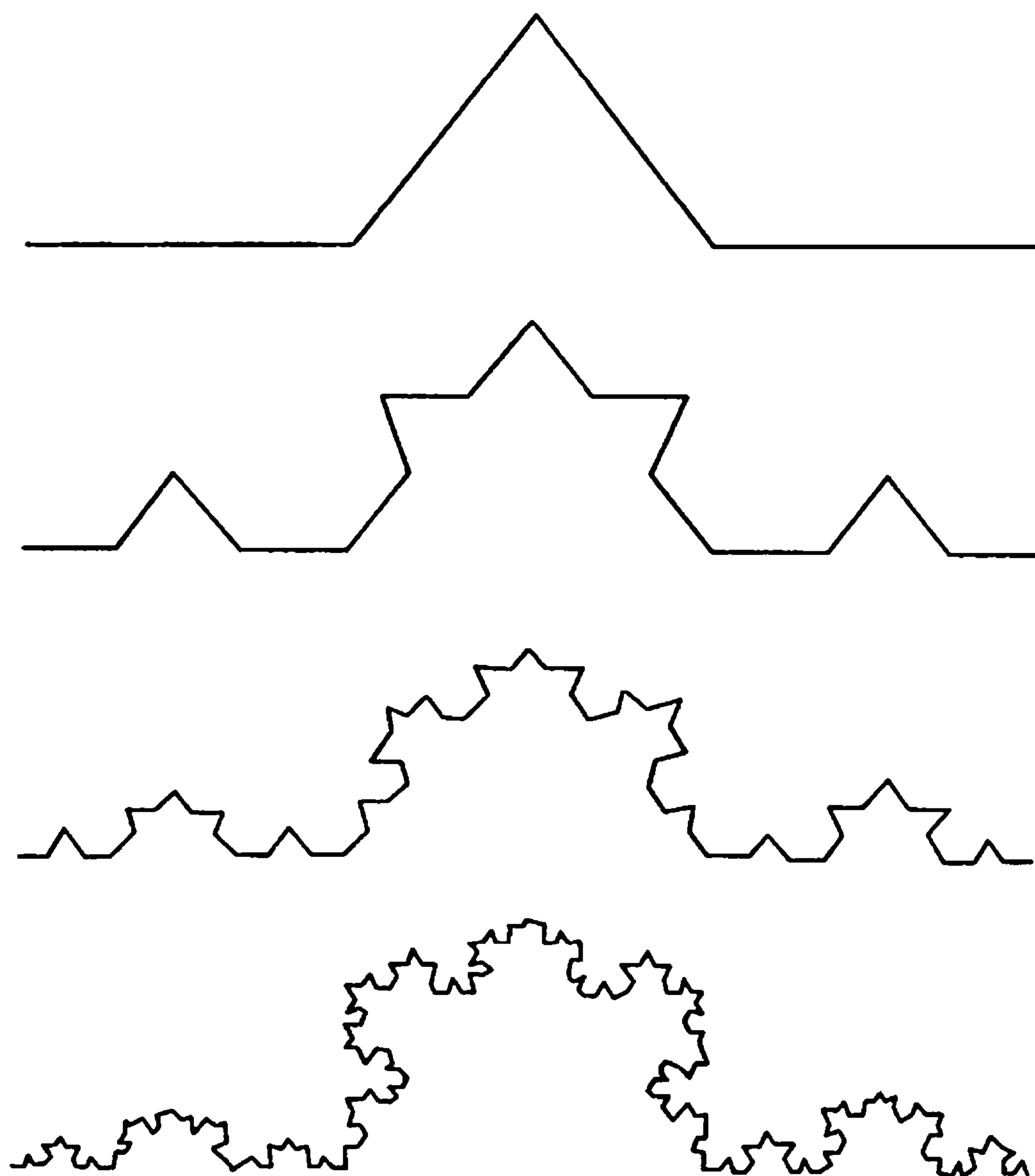


图 3—5 科和曲线

波兰数学家谢尔品斯基从平面二维图形出发，用重复某一过程的办法形成的曲线也是分形曲线。如谢尔品斯基垫，它以一个三角形作为源图形，以源三角形的 $1/4$ 大小的倒三角形作为生成元。在源三角形中除去生成元，然后在剩下的 3 个三角形中重复这一步骤，得到 9 个更小的三角形，不断重复上述步骤得到的极限曲线就称为谢尔品斯基垫（见图 3—6）。

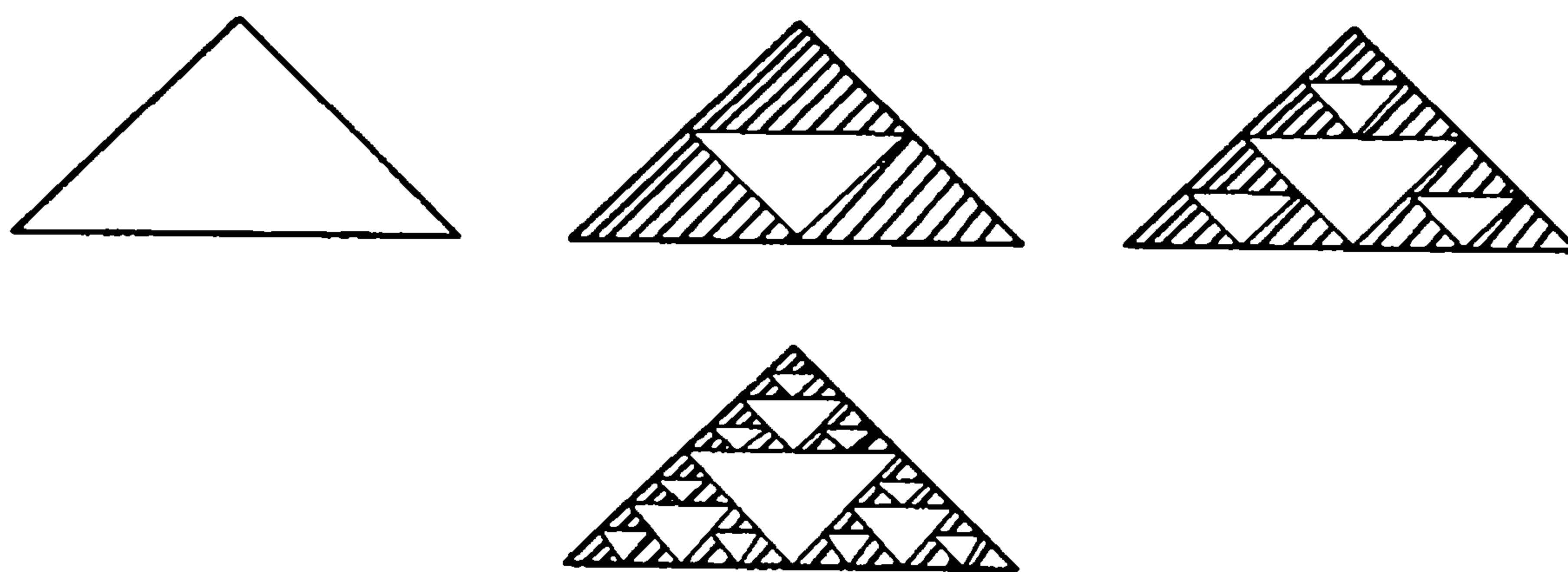


图 3—6 谢尔品斯基垫

分形理论和应用发展很快，但至今还没有关于什么是分形的统一定义。一般公认法尔科纳对分形定义的描述比较合理：

- 分形应有精细的结构，有任意小比例的细节；
- 它是如此的不规则，以致其局部和整体都不能用传统的几何语言来描述；
- 分形通常有某种自相似的形式，可能是近似的或是统计的；
- 其“分形维数”一般大于其拓扑维数；
- 分形通常能以非常简单的方法定义，由迭代方法产生。

三、分数维

刻画整形的重要特征量如长度、面积、体积等，对于刻画分形是没有意义的。用不同的丈量单位测量同一海岸线，得到的结果显著不同。这是因为，若以公里为单位，几十米以下的曲折将被忽略；若以米为单位，厘米数量级以下的曲折将被忽略。分形的主要几何特征是它的结构不规则性和复杂性，主要特征量应是关于这种不规则和复杂性程度的度量。这就引出分数维（简称分维）的概念。

“分形维数”是一个表征分形复杂或粗糙程度的量，在经典几何学中，人们相当熟悉的是：点是零维的，线是一维的，面是二维的，体是三维的，在希尔伯特空间还可以定义有无穷维的。这里一个共同的特征是它们都是整数维的。将这些几何图像做拉伸、压缩、扭曲、折叠等变换都不改变它们的维数。这种维数称为拓扑维，记做 d 。分维是完全不同的概念，若以 D 记之，则允许 D 取分数值，并且 D 一般情况下都取分数，所以称为分数维数。从维数这一性质看，分形的本质特征是它的分数维不小于它的拓扑维，即 $D \geq d$ 。

对于分数维的概念也可以从整维的概念推演出来。把欧氏维数的概念推广，得到的就是分形维数定义之一的相似维数。推广过程如下：

在图 3—7 中，以尺寸为 ϵ 的量尺测量大小为 L 的物体，量得的个数记为 N ，则有

$$N = (L/\epsilon)^D$$

式中， d 就是维数，从图 3—7 中可以看出， d 分别为 1，2，3。也可以认为：

$$D = \frac{\ln N}{\ln(L/\epsilon)}$$

把这种方法推广到谢尔品斯基垫上, 不难得到它的维数 d 为:

$$D = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1.584\ 96$$

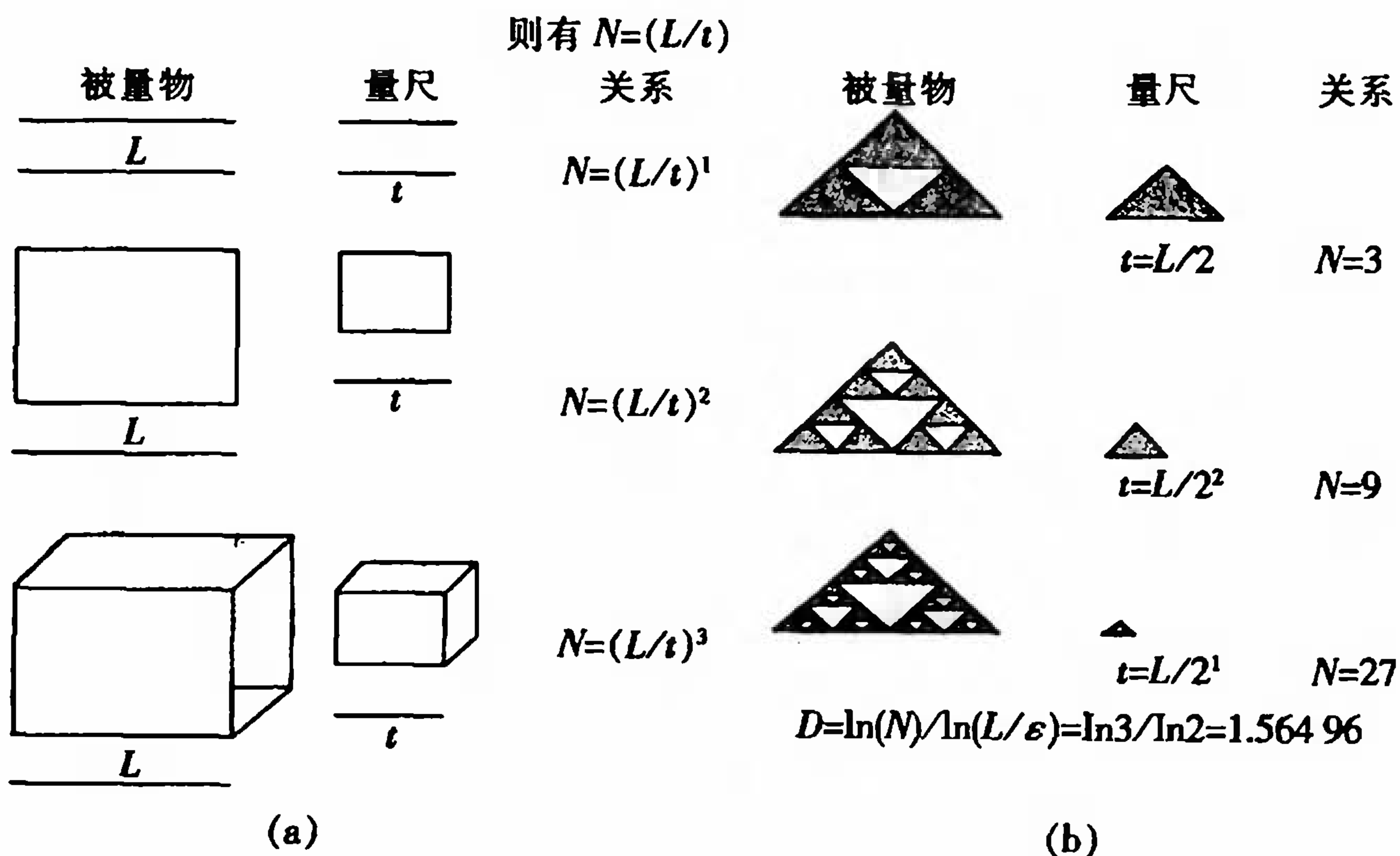


图 3—7 欧氏维数的推广

用类似的方法可以求得科和曲线的维数 $D = \ln 4 / \ln 3$ 。需要指出, 这种维数称为相似维数, 它适用于有严格自相似的分形集合。

现给出一个定义: 给定点集 X , $N(\epsilon)$ 是能够覆盖 X 的直径为 ϵ 的小球的数目, 如果有限极限 $D_0 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \ln N(\epsilon) / \ln(1/\epsilon)$ 存在, 则称 D_0 为点集 X 的容量维。

建立了分形维数的概念, 就可以理解为什么用传统的几何方法去度量不列颠海岸线或者科和曲线的长度时, 得不到准确结果。对待这些曲线, 要先计算其分形维数, 只有在相同维数下度量才有意义。

第三节 迭代函数系统 IFS

一、IFS 的基本算法思想

IFS (Iterated Function System, IFS) 是迭代函数系统的简称, 它是分形

图形绘制的一种重要的方法。IFS 的基本思想是选定若干仿射变换，将整体形态变换到局部，这一过程可以一直进行下去直到产生满意的结果。

IFS 方法是美国佐治亚理工学院的巴恩斯利教授首创的。IFS 方法的魅力在于它是分形迭代生成的“反问题”，根据拼接定理 (collage theorem)，对于一个给定的图形，求得几个生成规则，就可以大幅度压缩信息。

这里采用确定性算法与随机性算法相结合的办法生成植物杆茎或叶片。“确定性”指迭代的规则是确定性的，由一组仿射变换（如 R_1, R_2, R_3 , 等等）构成；“随机性”指迭代过程是不确定的，每一次究竟迭代哪一个规则，即 R_i 中具体哪一个，不是预先定好的，而要靠掷骰子的办法来决定。设最终要生成的图形（植物形态图）为 M ，它要满足下述集合方程：

$$M = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N$$

上式的含义是，随机地从 $R_i (i=1, \dots, N)$ 中挑选一个迭代规则迭代一次，然后再随机地在 $R_i (i=1, \dots, N)$ 中选一个规则迭代一次，不断重复此过程，最后生成的极限图形 M 就是欲求的植物形态图。

每个迭代规则 R_i 都是一个仿射变换。正交变换保持几何图形的度量性质（向量的夹角、点与点之间的距离、图形的面积等）不变；而仿射变换一般会改变图形中向量的夹角、点对点之间的距离、图形的面积等，但仿射变换不改变共线、平行、相交、共线点的顺序、中心对称、二次曲线的次数等。举例来说，原来平行的线段，经仿射变换后仍然是平行的，但长度可能发生了变化，点对点之间的距离也可能改变了。一个图形经仿射变换后面积变小了，则此变换是收缩的，如果变大了则是扩张的，若保持不变则是恒等的。这里只用到收缩性仿射变换，因为极限图形 M 应当是所有迭代 R_i 的吸引子，每个仿射变换是收缩性的才能保证迭代收敛到 M 上。

仿射变换是一种线性变换，在二维平面上进行讨论，二维仿射变换的形式为：

$$R: x' = ax + by + e \quad y' = cx + dy + f$$

上式中，未知数有 x 和 y 两个；系数有 a, b, c 和 d 四个；常数有 e 和 f 两个。

设平面上有面积区域为 D ，经仿射变换 R 变换后变成 D' ，则 D 与 D' 的面积关系为： $S(D') = |\det(A)| \cdot S(D)$

这里 $|\det(A)|$ 表示矩阵 A 的行列式的绝对值，它是小于 1 的正数，其中 A 为系数矩阵。

对于不同的 R_i ($i=1, 2, \dots, N$), 有相应的 A_i (由 a_i, b_i, c_i, d_i 组成), 相应的常数 e_i 和 f_i 。通常 N 取 2, 3, 4, 有时高达 16。

剩下的一个问题是怎样实现掷骰子操作。在计算机上可以很容易地用伪随机数发生器不断生成随机数, 用来代替人工抛掷有 N 个面的骰子。不失一般性, 设 $N=4$, 每次用计算机生成一个随机数 $E \in (0, 100)$, 设 $0 < \beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < 100$, 作如下规定:

- 若 $0 < E < \beta_1$, 则选择规则 R_1 ,
- 若 $\beta_1 \leq E < \beta_2$, 则选择规则 R_2 ,
- 若 $\beta_2 \leq E < \beta_3$, 则选择规则 R_3 ,
- 若 $\beta_3 \leq E < 100$, 则选择规则 R_4 。

指定 β_i 的过程, 相当于为每一种迭代规则 R_i 指派一个概率 p_i 。虽说具体每一次用哪个规则迭代不确定, 但从长期行为看, 每种规则使用的频率是一定的。当然这种概率可以随意指定, 但是为了使得迭代高效、迅速, 概率的大小应与仿射变换的图形压缩率成正比。图形压缩率就是前文所说的 $|\det(A)|$, 对于 $N=4$ 的情况, 它有 4 个。

至此可以知道, 每一种规则 R_i 都包括 7 个参数 (或系数): $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i, p_i$ 。要求 $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$ 。如果生成某一种植物形态需要 4 种规则, 则共有 $4 \times 7 = 28$ 个参数。只要给定了这些参数, 实际上极限图形 M 就完全确定了。开始迭代时可能还一时看不出 M 的面貌, 但过了一会以后, M 的轮廓就可以看清楚了, 最后 M 的精细结构就展示出来了。浙江大学数学系陈刚最近还研究了准仿射变换的一些性质。用准仿射变换也能生成各种分形图形。

图 3—8 就是用 IFS 方法生成的图像, 此图像的算法由美国佐治亚工学院的巴恩斯利首创, 它像不像蕨类植物的叶子? 生成此叶子用了 4 个仿射变换 R_1, R_2, R_3 和 R_4 。7 个参数的取值见表 3—1。

表 3—1 参数的取值

R	a	b	c	d	e	f	p
1	0	0	0	0.16	0	0	0.01
2	0.85	0.04	-0.04	0.85	0	1.6	0.85
3	0.2	-0.26	0.23	0.22	0	1.6	0.07
4	-0.15	0.28	0.26	0.24	0	0.44	0.07

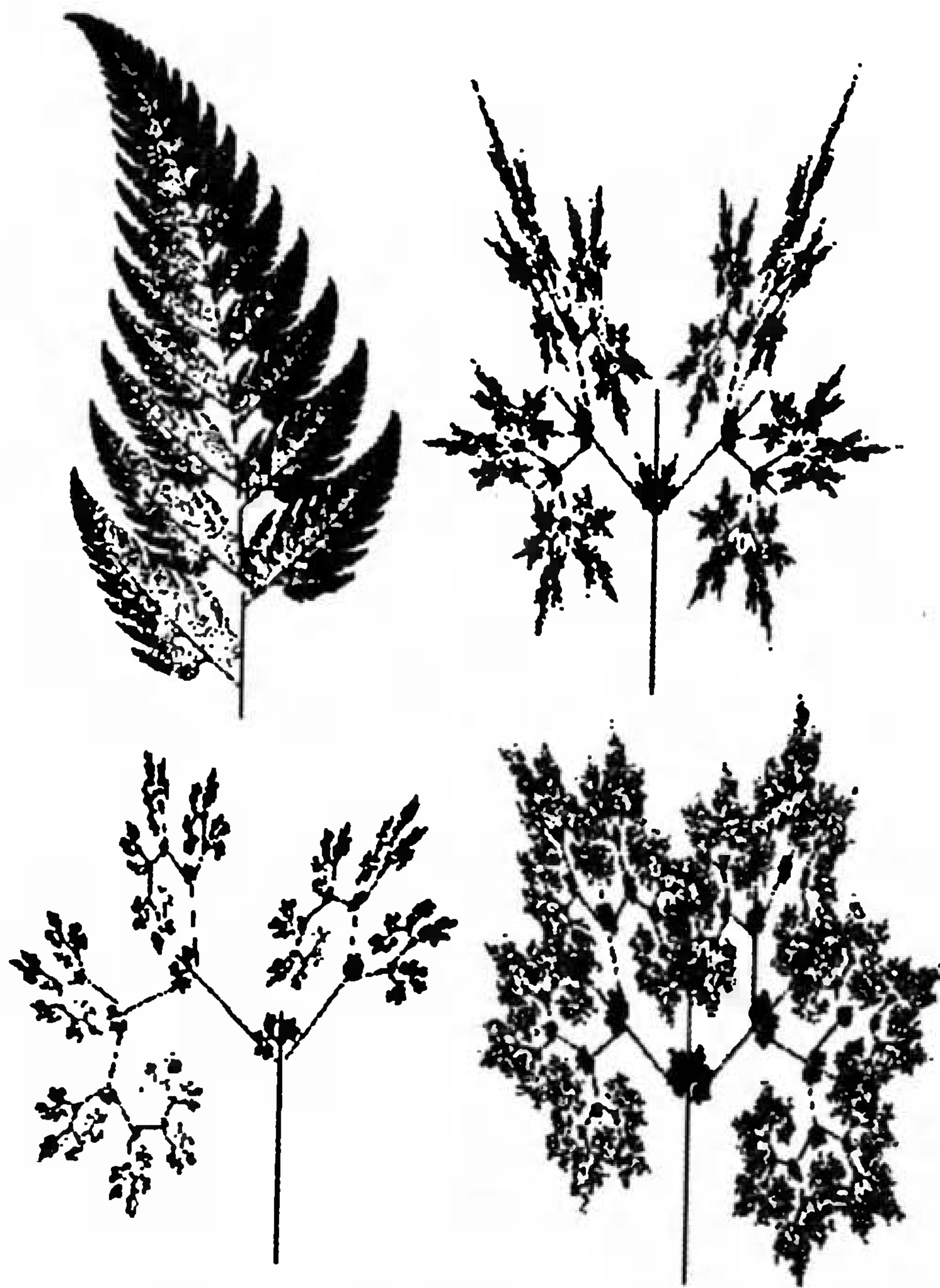


图 3—8 用 IFS 方法生成的植物形态

增减规则 R_i ，可以改变最终植物 M 的形态。即使不改变迭代规则，采用同样的程序，只改变参数也可以生成完全不同的植物形态。为了使程序具有通用性，可以设计如下“过程”：

```

Procedure AFF(a,b,c,d,e,f,S,T:real);
Var lins:real;
Begin
  lins:=a*S+b*T+e;
  y:=c*S+d*y+f;
  x:=lins;
End;

```


程序中不断调用此过程 AFF, 即可完成迭代。这样, 每次修改参数, 只需改变数组中的数据就可以了。由此得到一个启示: 外表极不相同、极复杂的形态, 背后控制其生长的规律可能是相同 (或相似) 的、简单的。再推一步, 分子水平上控制形态发生的 DNA 遗传编码, 也应当是简单的。这一猜想有许多合理之处, 直观上想象一下, DNA 分子不可能承载过多的形态控制信息。

对于表 3—1, 如果把其中的第二行中表项 (a, b, f) 的值由 (0.85, 0.04, 1.6) 改为 (-0.85, 0.09, 2.6), 则会生成蒿草。对于表 3—2, 若把第二行和第三行的表项 c 分别由 0.42 改为 0.2 (保留符号), 则会生成六角枫叶; 若把 (a, b) 两列的 0.12 和 0.82 都改成 0.42 (保留符号), 则会生成树冠。读者也可以自己改变参数, 试验着生成各种精美的分形植物形态。

表 3—2

树叶 B 的参数表

R	a	b	c	d	e	f	p
1	0	0	0	0.5	0	0	0.05
2	0.12	-0.82	0.42	0.42	0	0.2	0.4
3	0.12	0.82	-0.42	0.42	0	0.2	0.4
4	0.1	0	0	0.1	0	0.2	0.15

二、IFS 的计算机程序实现

现在我们将这种过程用计算机程序来实现, 下面给出生成以上形态的程序, 有兴趣的读者可以自己试着运行一下。

{IFS 生成植物形态 PASCAL 程序}

```

Program FractalPlant28;
Uses Graph, Crt;
var
  x, y, E, u: real;
  Gd, Gm: integer;
Begin
  Gd := VGA; {用 VGA 方式 640×480}
  Gm := VGAHi;

```

```

Initgraph(Gd,Gm,'D:\PASCAL');{初始化图形}
if GraphResult<> grOK then Halt(1);{若出错则停机}
  x:=0;y:=0;{赋初值}
Randomize;{初始化随机数发生器}
Repeat
  E:=Random(100);{产生一个介于 0 至 100 之间的随机数}
  if E<1 then
    Begin
      x:=0;y:=0.16 * y;{用 R_1 迭代}
    End;
  if (E>=1) and (E< 86) then
    Begin
      u:=0.85 * x+0.04 * y;y:=-0.04 * x+0.85 * y+1.6;{用 R_2 迭代}
      x:=u;
    End;
  if (E>= 86) and (E< 97) then
    Begin
      u:=0.2 * x-0.26 * y;y:=0.23 * x+0.22 * y+1.6;{用 R_3 迭代}
      x:=u;
    End;
  if E>=97 then
    Begin
      u:=-0.15 * x+0.28 * y;y:=0.26 * x+0.24 * y+0.44;{用 R_4 迭代}
      x:=u;
    End;
  PutPixel(Round(50 * x)+300,500-Round(50 * y),2);{描点,绿色}
Until KeyPressed;{按任意键退出}
CloseGraph;{关闭图形方式}
End.

```

最后我们给出一个用 IFS 方法生成如图 3—9 山脉地形的小程序 Mount. PAS:

```

{Mount. PAS}
Program IFSMountain;
uses Graph,Crt;

```

```

var
  Gd,Gm,ErrorCode : integer;
  x,y: real;
  k,MaxY,integer;
  i,longint;
  d: array[1..4,1..6] of real;
begin
  Gd:= Detect;
  InitGraph(Gd,Gm,'d;\pascal');
  ErrorCode := GraphResult;
  if ErrorCode <> grOk then exit;
  MaxY := GetMaxY;
  d[1,1]:=0.5; d[1,2]:=0; d[1,3]:=0;
  d[1,4]:=0.5; d[1,5]:=0; d[1,6]:=0;
  d[2,1]:=0.5; d[2,2]:=0; d[2,3]:=0;
  d[2,4]:=0.5; d[2,5]:=2; d[2,6]:=0;
  d[3,1]:=-0.4; d[3,2]:=0; d[3,3]:=1;
  d[3,4]:=0.4; d[3,5]:=0; d[3,6]:=1;
  d[4,1]:=-0.5; d[4,2]:=0; d[4,3]:=0;
  d[4,4]:=0.5; d[4,5]:=2; d[4,6]:=1;
  randomize;
  x := 0; y := 0;
  repeat
    i:=i+1;
    k := random(4) + 1;
    x := d[k,1]*x + d[k,2]*y + d[k,5];
    y := d[k,3]*x + d[k,4]*y + d[k,6];
  if i>10 then
    putpixel(round(MaxY * x/2),MaxY-round(MaxY * y/2),15)
    until keypressed;
  closegraph;
end.

```

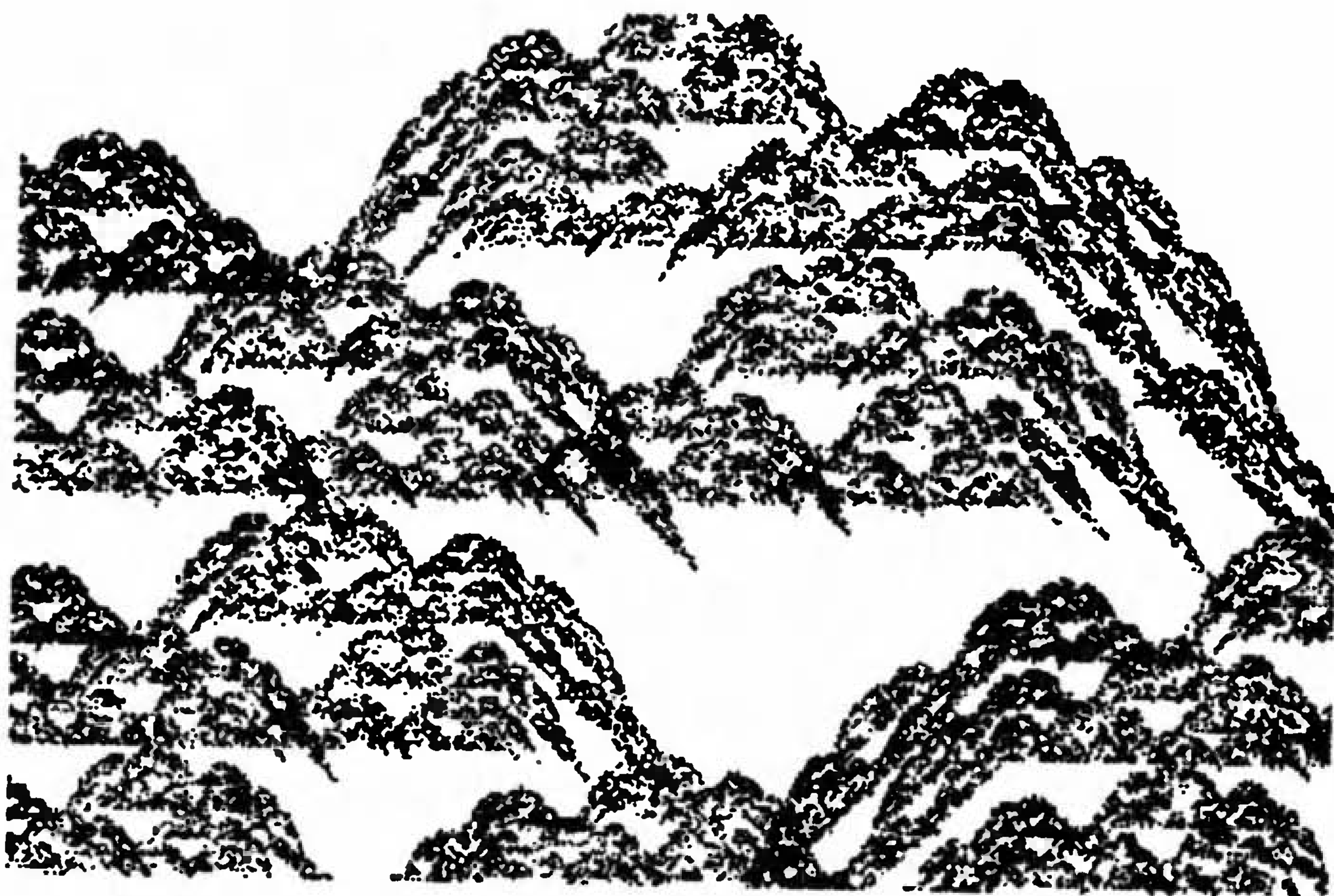



图 3—9 用 IFS 方法生成的地貌

第四节 Logistic 方程

一、分岔

分岔是有序演化理论的基本概念，但分岔序列的存在又往往是出现混沌的先兆。在混沌学词典中，最早提到的往往是分岔。

首先，我们介绍几个动力学概念。动态系统的可能状态分为两类，一类是暂态或过渡态，代表系统在某一时刻到达又旋即离开的状态，即可以到达但不能保持的状态；另一类是定态，代表系统可以到达，并且在到达后若无外部扰动就不再离开的状态。定态又分为两类，受到扰动后就不再能够保持的是不稳定定态，在小扰动消除后能够自动恢复如初的是稳定定态。最简单的定态是平衡态，在数学上平衡态就是运动方程或映射的不动点。

现在来讨论分岔概念。在系统演化过程中的某些关节点上，系统的定态行为可能发生定性性质的突然改变，原来的稳定定态变为不稳定定态，同时出现新的定态，这种现象就叫分岔。从数学上讲，分岔意味着运动方程解的性质发

生重大变化，原来的解不再稳定，出现了新的稳定解。发生分岔现象的关节点叫做分岔点。分岔是由运动方程中参数变化造成的，分岔点是参数空间的点，不是状态空间的点，分岔问题总是放在参数空间中讨论的。

二、Logistic 方程的分岔现象

我们现在来考察 Logistic 方程。Logistic 方程通常写作

$$X_{n+1} = aX_n(1 - X_n)$$

设 x 代表某种昆虫种群的虫口数（状态变量），考察它的演化行为。 a 为控制参数，与种群增长率有关。方程的实际意义要求 x 在 $(0, 1)$ 之间取值，区间 $[0, 1]$ 就是系统的状态空间。参数 a 在 $(0, 4)$ 之间取值，区间 $[0, 4]$ 就是系统的参数空间。则在不动点处方程就可以写作

$$x^* = ax^*(1 - x^*)$$

显然，存在两个不动点 $x_1^* = 0$ 和 $x_2^* = 1 - 1/a$ ， x_2^* 因 a 不同而不同。当 $0 < a < 1$ 时， x_1^* 稳定， x_2^* 不稳定。任取初值 $x_0 \in (0, 1)$ ，经过若干次迭代，系统趋于终态 $x = 0$ ，意味着虫口系统灭绝。 $a_0 = 1$ 是一个临界点，只要 $a > 1$ ，不动点 x_1^* 不再稳定，但 x_2^* 开始变为稳定解。任取初值 $x_0 \in (0, 1)$ ，迭代后演化的情况如图 3—10 所示。

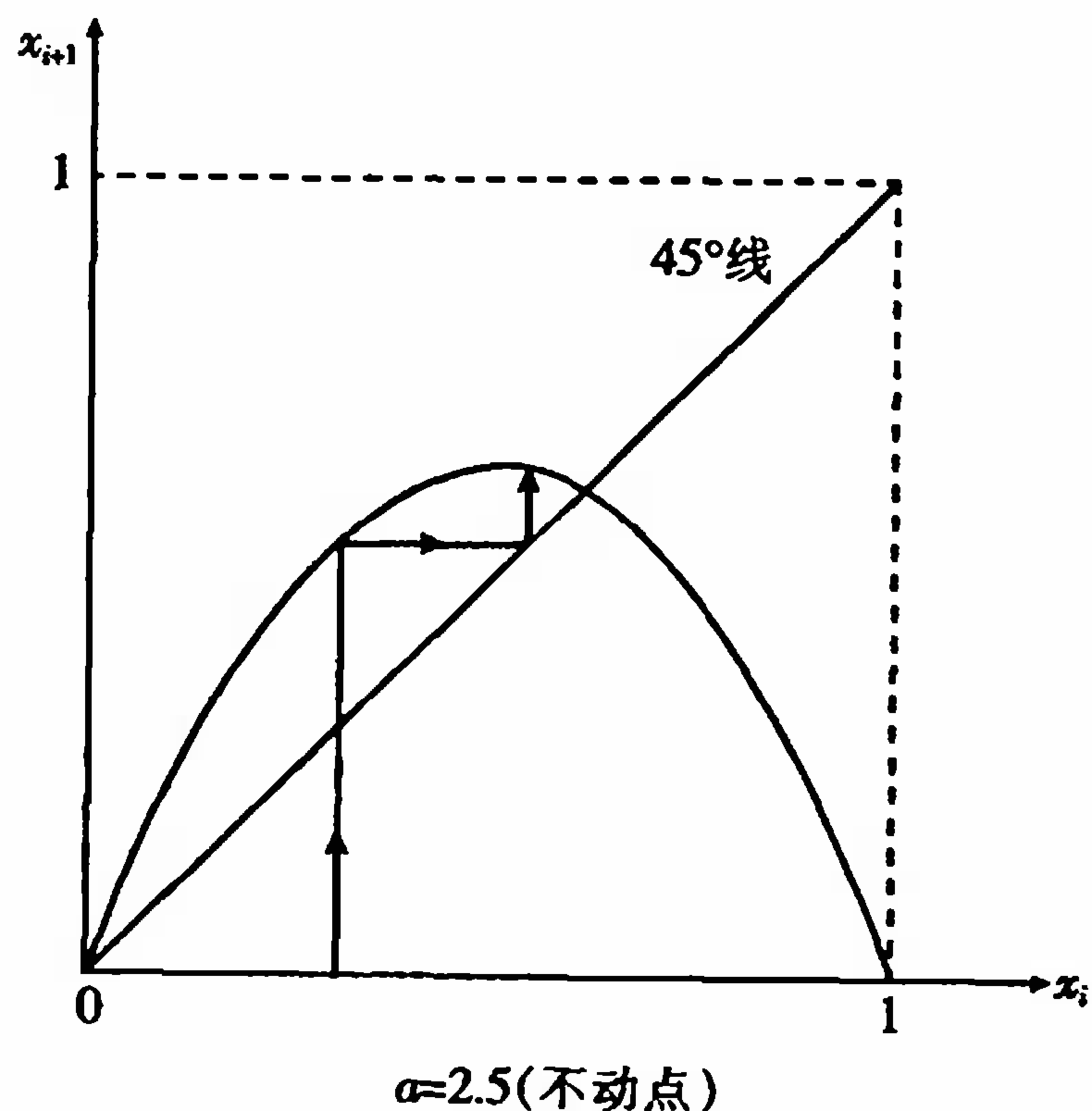


图 3—10

经过一系列的过程态，系统越来越趋向稳定平衡态 $x_2^* = 1 - 1/a$ 。随着 a 值增大，稳定平衡态 x_2^* 也增大，但系统行为没有发生定性性质的变化，都保持在平衡态上。 $a = a_1 = 3$ 是又一个临界点， $a > 3$ 时， $x_2^* = 1 - 1/a$ 也失去稳定性。只要初值稍微偏离平衡态，迭代结果就会永远离开该状态，经过一定的过渡过程而趋于一个稳定的两点周期运动 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$ 。若取 $a = 3.15$ ，则稳定的两点周期点为 $\bar{x}_1 = 0.533\ 494\ 7$ ， $\bar{x}_2 = 0.783\ 965\ 7$ 。继续进行迭代计算，结果就是这两个数值交替出现，表明系统周而复始地在这两点运动。

对于虫口系统，这意味着今年的虫口数为 $\bar{x}_1$ ，明年的虫口数为 $\bar{x}_2$ ，大后年的虫口数又回到 $\bar{x}_2$ 。在 $a = a_1 = 3$ 处原来的一个稳定不动点变为稳定的两点周期，意味着系统在演化过程中发生了分岔， $a = a_1 = 3$ 而且是周期加倍分岔，是一个分岔点。

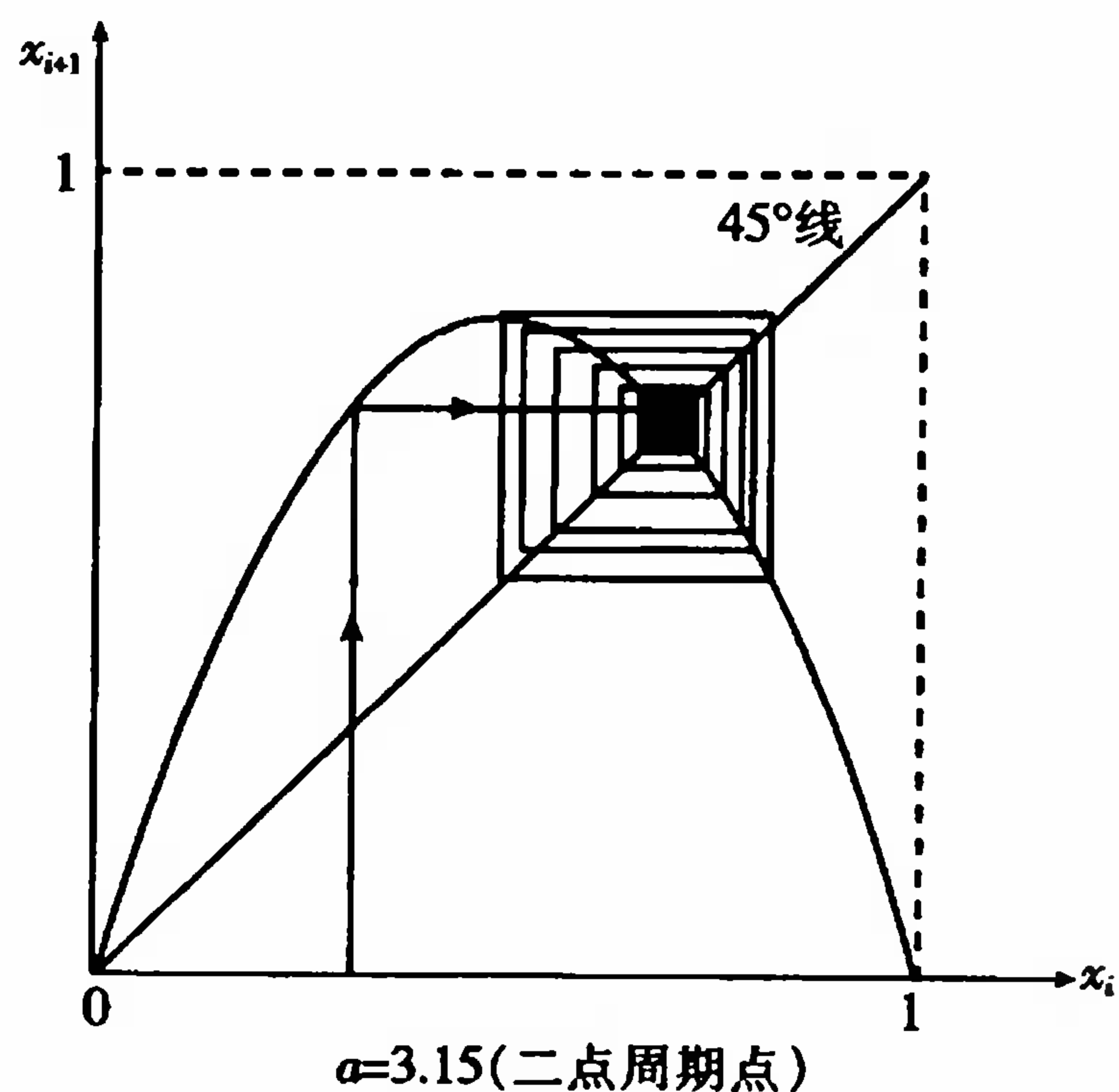


图 3—11

在 $a > 3$ 的一定范围内，不论 a 取什么值，对于 $(0, 1)$ 中几乎所有初值，系统的定态行为都是两点周期运动，不同的只是周期点的位置有一点点变化。

$a = a_2 = 1 + \sqrt{6}$ 是第三个临界点，从这点开始，上述的两点周期运动也变得不稳定了，但每一点都同时发生新的二分岔。整个系统形成一个稳定的 4 点周期运动。也就是说，系统的值始终都在 4 个值中轮换。取 $a = 3.52$ ，这四个值为 0.512 072 8，0.879 486 6，0.373 084 6，0.823 301 1。这个四点周期组成的稳定周期 4 轨道如图 3—12 所示。

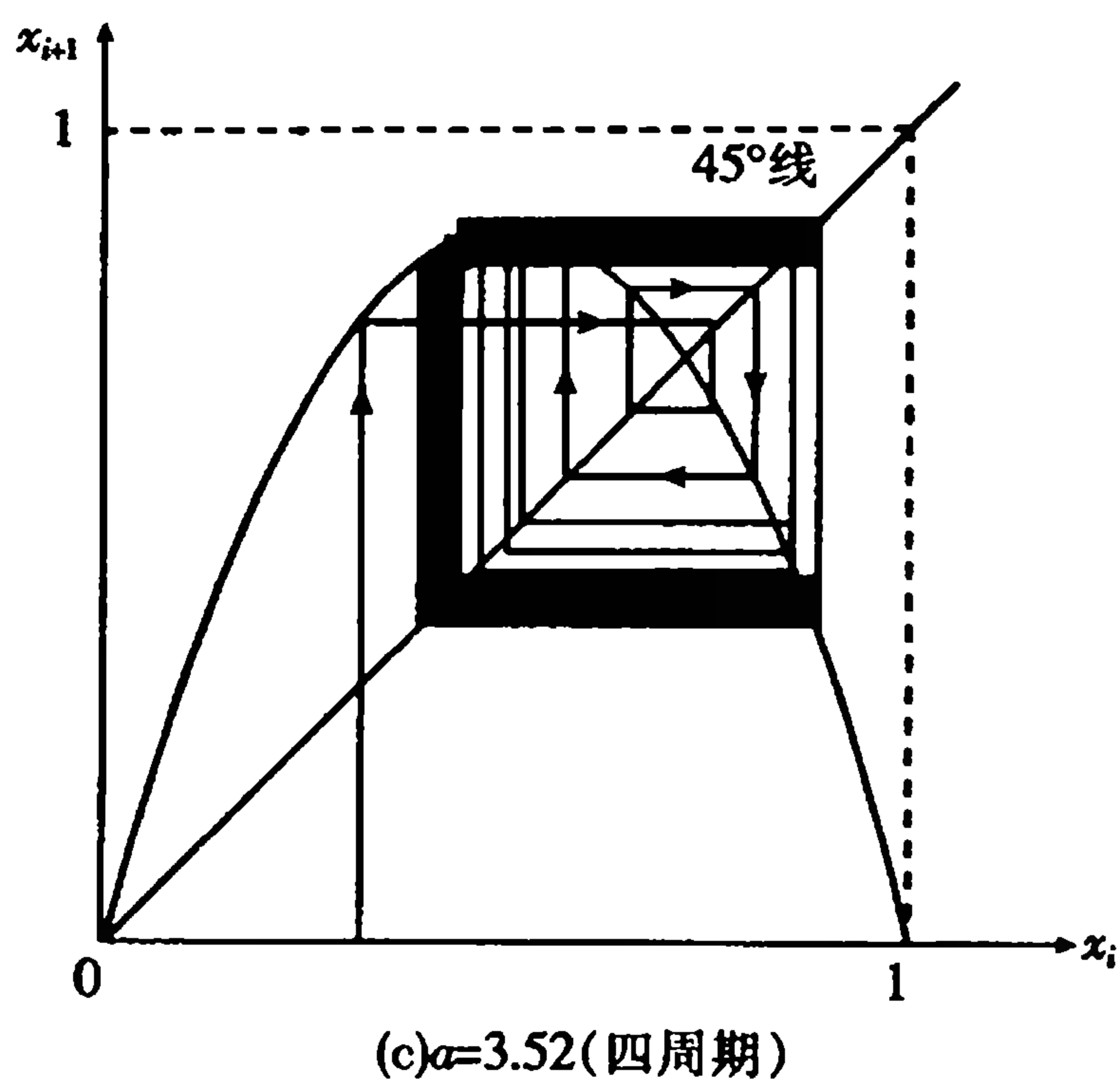


图 3—12

随着 a 值的进一步增大, 稳定的 4 点周期运动继续保持一段。但在临界 $a=a_3 \approx 3.544$ 处 4 点周期也失去了稳定性, 同时每一点都发生二分岔, 形成一个稳定的 8 点周期。然后, 在新的临界点 $a=a_4 \approx 3.544$ 处分岔为稳定的 16 点周期。当 a 继续增大, 在 $a=a_5$ 处系统分岔为 32 周期; 在 $a=a_6$ 处分岔为 64 周期等等。对于任一正整数 k , 都有一个确定的临界点 a_k , 当 a 稍稍大于 a_k 时, 原来的 2^{k-1} 点周期失去稳定性, 分岔为稳定的 2^k 点周期, 并且系统会出现稳定的 2^k 点周期运动, 这种现象叫做倍周期分岔, 又叫周期倍化分岔。

三、Logistic 方程的计算机程序实现

我们现在使用一个计算机程序来模拟这种反复迭代的过程, 从不同的取值中, 可以清楚地看到系统各种完全不同的状态。程序如下:

```
PROGRAM CHAOS_GAME;
uses graph, crt;

type top_point = array[1..3, 1..2] of integer;

* 定义四个字符串常量
const str0 = 'Continue or Stop?';
      str1 = 'a = ';
      str2 = 'x(0) = ';
      str6 = 'Process times, continue? (Y/N)';

* 定义变量
```

```

var gd, gm, err, c: integer;
    i, il, j, k, m, n: integer;
    a, x0, x, y: real;
    ans, ans1: string;
    str3, str4, str5: string;
    str7, str8: string;

label start, finish;

begin
    * 初始化作图环境
    {graph prepare }

    gd:=detect;
    initgraph(gd, gm, 'C:\pascal\tp\bgi');
    err:=graphresult;
    if err<>grok then halt(1);

    * 设置背景颜色和前景颜色
    setbkcolor(10);
    setcolor(4);

    * SetTextStyle(字体,方向,字号);{设置字模}
    settextstyle(4,0,3);
    settextjustify(1,1);

    * OutTextXY(横坐标,纵坐标,欲输出的字符串);{输出文字}
    outtextxy(320,20,'Logistic Equition:  $x(n+1)=a \cdot x(n) \cdot [1-x(n)]$ ');
    settextstyle(1,0,2);

    start;

    * readln(<>) 从标准输入文件中读入数据,并依次赋给相应的变量
    * val(S,x,code) 将字符串 S 转换成整数或实数 x,若 S 中有非法字符,则 code 存放非法
    字符在 S 中的下标;否则,code 为零。code 为整型变量
    outtextxy(480,200,str1); gotoxy(64,13); readln(str4); val(str4,a,c);
    outtextxy(480,300,str2); gotoxy(64,20); readln(str5); val(str5,x0,c);

    line(50,20,50,420);
    line(50,420,450,420);
    line(50,420,450,20);

    * PutPixel(横坐标,纵坐标,颜色值);

```

```

for i:=51 to 450 do
  begin
    x:=(i-50)/400.0;
    y:=a*x*(1-x);
    j:=420-round(y*400.0);
    putpixel(i,j,3);
  end;

k:=1;
ans:='y';
x:=x0;      i:=50+round(x*400.0);
y:=a*x*(1-x);  j:=420-round(y*400.0);
line(i,420,i,j);  moveto(i,j);

  { Draw process}
  循环划线和点
repeat
  for m:=30 to 600 do
    for n:=450 to 475 do
      putpixel(m,n,10);
    x:=y;
    il:=(420-j)+50;
    line(i,j,il,j); moveto(il,j); i:=il;
    y:=a*x*(1-x);
    j:=420-round(y*400.0);
    lineto(i,j);moveto(i,j);
    k:=k+1;
    str8:='
str(k,str7);
str8:=str6;
insert(str7,str8,10);
outtextxy(320,460,str8); gotoxy(70,24); readln(ans);
until ans='n';
outtextxy(450,100,str0); gotoxy(70,7); readln(ans1);
if ans1='y' then goto start;
finish;
closegraph;
end.

```


运行这个程序，当 $a=2.5$ 时，系统处于一个稳定态，如图 3—13 所示。

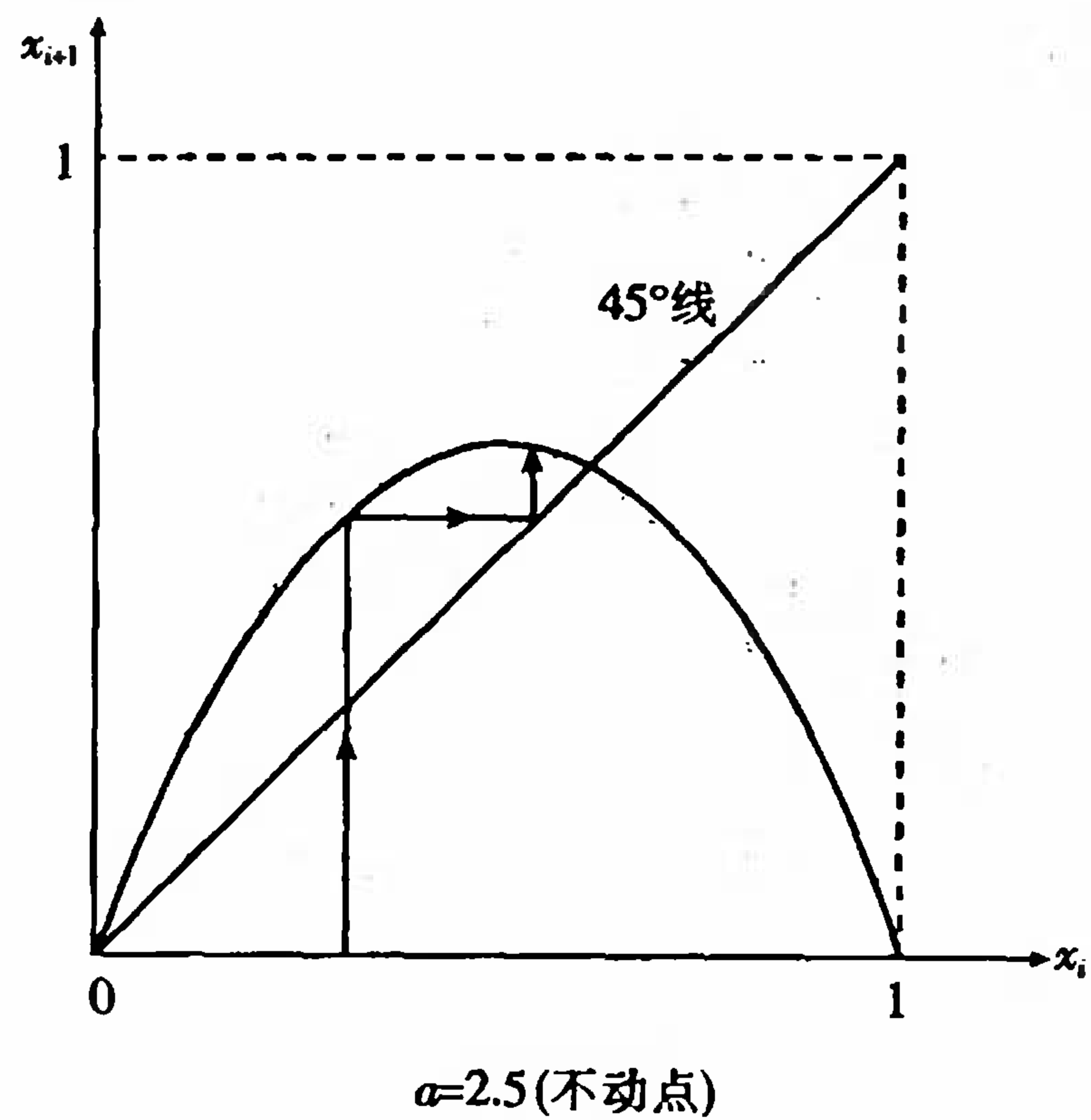


图 3—13

当 $a=3.2$ 时，系统在两个状态中间来回转换。如图 3—14 所示。

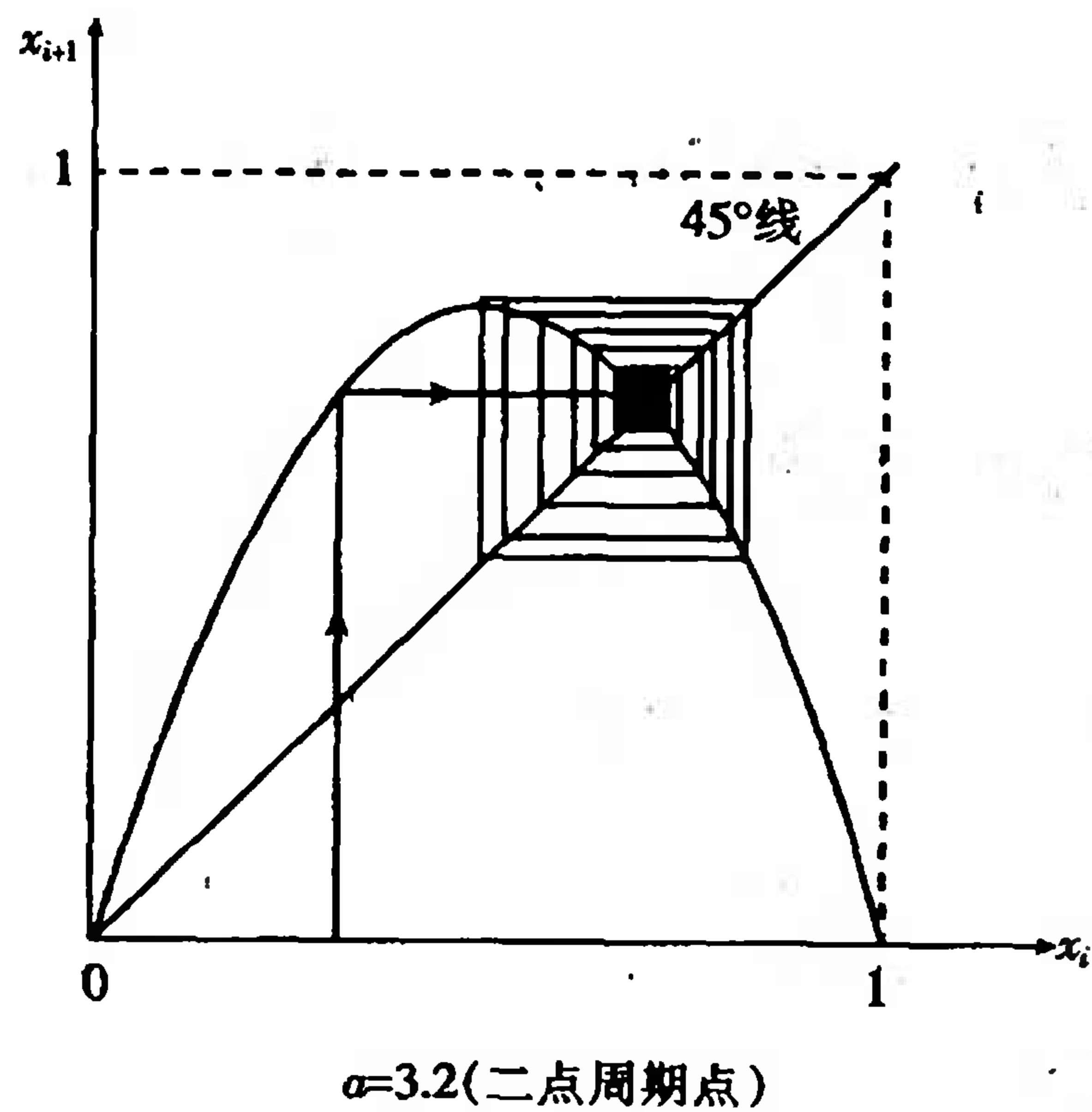


图 3—14

当 $a=4$ 时，系统呈现出一种混沌状态。如图 3—15 所示。

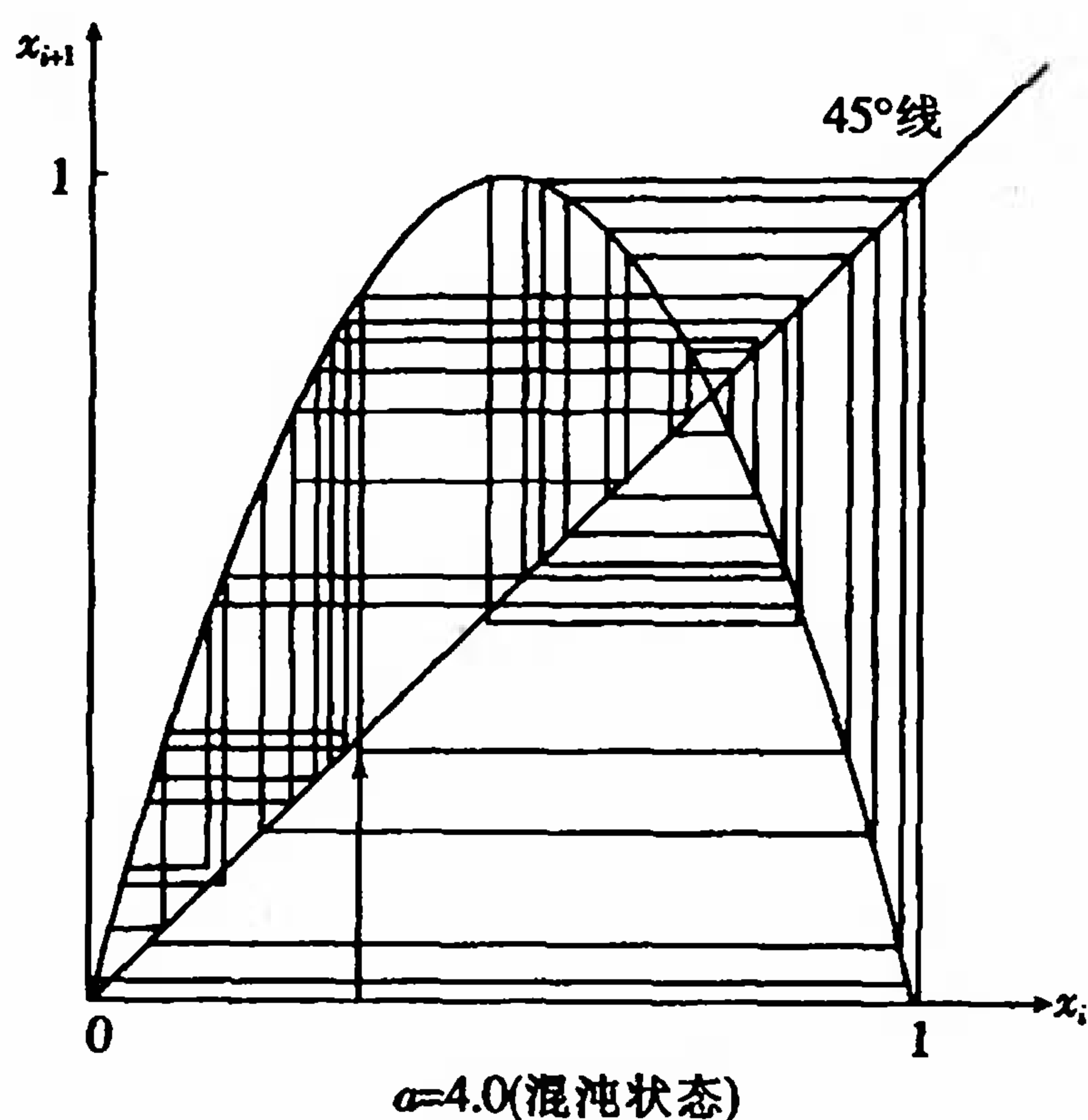


图 3—15

因此可以得出，在 Logistic 方程里，随参数 a 的变化，系统出现完全不同的状态，这反映了一种分岔现象。也表明了一个确定性的过程可以出现随机的结果。

第五节 元胞自动机和人工生命

一、元胞自动机的基本概念

元胞自动机，英文名 Cellular Automata，简称 CA，有的文献中译为细胞自动机、分子自动机、点格自动机或单元自动机等。20 世纪 50 年代，冯·诺伊曼（von Neumann）为了构造一个能够自我复制的机器，首次提出了元胞自动机的概念。目前，元胞自动机已经成为各类学科研究的重要工具，在应用领域得到了长足的发展，其范围涉及社会学、生物学、生态学、信息科学、计算机科学、数学、物理学、化学、地理、环境、军事学等。

元胞自动机由一些被称为元胞的基本部件组成，每个元胞具有一定状态，这些状态是离散的，而且元胞在某一时刻只能处在一种状态之中。这些元胞规则地排列在被称为元胞空间的空间网格上。元胞空间可以是一维、二维或多维的欧几里德空间。网格是离散的，且每个网格只能容纳一个元胞。每个元胞有

自己的邻居元胞。元胞的状态会随着时间变化，时间步是离散的，元胞下一时刻的状态决定于本身状态和它的邻居元胞的状态。元胞空间内的所有单个元胞依照这样的局部规则进行同步的状态更新，整个元胞空间则表现为在离散的时间维上的变化。

构型是指在某个时刻，在元胞空间上所有元胞状态的空间分布组合。构型也被称为全局状态（global state）。

在理论上，元胞空间通常在各维度上是无限延展的，但是在实际应用过程中，我们无法在计算机上实现这一理想条件，因此，我们需要定义元胞空间的边界，常见的有周期型、反射型、定值型和随机型。

在一维元胞自动机中，通常以半径来确定邻居，与一个元胞相距在一个半径的距离之内的所有元胞（除自身之外）均被认为是该元胞的邻居。二维元胞自动机的邻居定义较为复杂，以最常用的规则四方网格划分为例，常见的有冯·诺依曼（Von Neumann）型（即一个元胞的上、下、左、右相邻四个元胞为该元胞的邻居）和摩尔（Moore）型（即一个元胞的上、下、左、右、左上、右上、右下、左下相邻八个元胞为该元胞的邻居）。

一个元胞及其所有邻居的集合称为邻域。

根据元胞当前状态及其邻居状况确定下一时刻该元胞状态的函数就是规则。这里我们遇到一个典型的组合爆炸问题。假设元胞自动机中每个元胞存在 k 种状态，其邻域拥有的元胞个数是 n ，那么邻域存在 k^n 种状态。元胞的规则，或称元胞自动机的转换函数，要将 k^n 种状态映射为 k 种状态的一种，则共有 $k^{(k^n)}$ 种转换函数存在。这是一个天文数字。有时，为了处理问题的方便，或者为了更接近现实，我们可以定义另外的规则，比如总和规则，它规定每个元胞的状态，只与其邻域状态之和有关。按这种方式进行映射，可以使规则数量由指数级减少为线性级。

二、元胞自动机理论发展的几个里程碑

元胞自动机理论产生以来，得到了长足的发展。下面介绍几个重要的里程碑。

（一）康卫与生命游戏

生命游戏（Game of Life）由剑桥大学的数学家康卫（John Horton Conway）于 1970 年提出。它是一个二维元胞自动机。元胞空间是一个分割成很多四方格子的平面，方格上存活着单个元胞，每个元胞有 8 个邻居，即采用

Moore 邻居形式。这些元胞有两种状态：“生”或“死”。存活的元胞在方格内涂上特定单一的颜色，而死亡的元胞则不涂色。其游戏规则如下：

- 对于存活的元胞（涂色的方格）：当 8 个邻近元胞中，恰有 2 个或 3 个是活元胞时，则该元胞继续存活；否则会因孤独或者拥挤而死亡。
- 对于死亡的元胞（未涂色的空方格）：当 8 个邻近元胞中，恰有 3 个是活元胞时，则该元胞起死回生。

尽管生命游戏的规则看上去很简单，但是它能产生丰富的、有趣的图案。给定某个初始状态分布，经过若干步的运算，有的图案会很快消失，而有的图案则固定不动，有的周而复始重复两个或几个图案，有的蜿蜒而行，有的则保持图案定向移动，形似阅兵阵……其中最为著名的是“滑翔机”的图案。每运行一次，出现在屏幕上的图案便会有所不同，无法穷其可能性。这些小方格的变化展现了许多类似生命的特质，例如，移动、成长、灭亡与自我复制等行为。康卫还证明，这个元胞自动机具有通用图灵机的计算能力。

（二）沃尔夫拉姆对元胞自动机的分类

沃尔夫拉姆（Wolfram）在 1984 年对最简单的元胞自动机——初等元胞自动机进行了深入探讨，并在此基础上发现了元胞自动机的动力学分类规律。

初等元胞自动机（Elementary Cellular Automata，简称 ECA）是元胞状态集 S 只有两个元素 $\{0, 1\}$ （即状态个数 $k=2$ ），邻居半径 $r=1$ 的一维元胞自动机。此时，邻域集所含的元胞个数为 3。下表所列映射便是其中的一个规则。

t	111	110	101	100	011	010	001	000
$t+1$	0	1	0	0	1	1	0	0

由 $t+1$ 时刻产生的 8 个值组成一个二进制（注意高低位顺序）。例如，对上面的规则，可得到 0100 1100，计算它的十进制值 R ：

$$R = \sum_{i=0}^{i=7} S_i 2^i = 76$$

沃尔夫拉姆定义 R 为初等元胞自动机的标号，则上面的元胞自动机模型就是 76 号初等元胞自动机。显然 R 在 $[0, 255]$ 内。

沃尔夫拉姆用一个动画区域来演示元胞自动机的演化，横轴为元胞自动机在对应时刻的构型，纵轴表示时间的流逝（往下为正）。在初始构型随机生成的情况下，沃尔夫拉姆详细观察了这 256 种初等元胞自动机演化生成的图案，将其分为以下四类。

第 1 类：经过几步演化后屏幕变成全黑或者全白。如 224 号和 254 号。

第 2 类：虽然存在很多不同的最终状态，但是它们都组成一些特定的简单结构，这些结构要么永远不变，要么周期性重复。如 132 号和 208 号。

第 3 类：演化处于一种混乱的、无序的状态，虽然三角形和其他小规模的结构一直会在某个标准上出现，但整体上表现出随机。如 18 号和 150 号。

第 4 类：既不等同于完全的随机，又没有固定的循环迹象。某些局部结构保持固定不变，但是某些局部结构在屏幕上线性移动。这些结构之间以复杂的方式进行交互。这种复杂结构既没有被吸引到固定的点或周期状态而变得死板，又没有因为随机而过于活跃。它既保证了一定的流动活性，同时又能产生具有“记忆性”的结构。如 110 号。

进一步的研究表明，二维元胞自动机也无非就是这四种情况之一。“生命游戏”即属于第 4 类。后来经过更进一步的研究表明，其他形形色色的元胞自动机都可划分为此四种基本类型。

我们知道，元胞自动机可视为离散动力系统，如果与连续动力系统进行类比，我们可以说：第 1 类元胞自动机具有点态吸引子；第 2 类元胞自动机具有周期吸引子；第 3 类元胞自动机具有混沌吸引子；而第 4 类元胞自动机在连续动力系统中没有相对应的模式，它是元胞自动机的一种独特的行为表现。

（三）朗顿的工作与“混沌的边缘”

美国学者朗顿（Langton）于 1984 年底发现了在很多元胞自动机中存在某个参数 λ ，随着参数 λ 由 0 到 1 变化，元胞自动机的行为可以从第 1 类变化到第 2 类，然后到第 4 类，最后到达第 3 类。

朗顿将运行于第 4 级别的系统状态称为“混沌边缘”（On the Edge of Chaos）。当处于该状态时，系统会表现出复杂现象：在这个层次的行为中，该系统的元素从未完全锁定在一处，但也从未解体到骚乱的地步。这样的系统既稳定到足以储存信息，又能快速传递信息。这样的系统是具有自发性和适应性的有生命的系统，它能够进行复杂的计算，从而对世界做出反应。

朗顿利用此设想准确地预测了固体和流体之间存在的相变。后来的种种迹

象表明，朗顿的发现具有普遍性的意义，在各个研究领域中都陆续发现了处于“混沌边缘”的各种行为。“混沌边缘”已经成为当前复杂性科学研究的一个重要成果和标志性口号，它也是圣塔菲（Santa Fe）学派的旗帜。

（四）沃尔夫拉姆和《一种新科学》

沃尔夫拉姆于 2002 年出版其新著《一种新科学》（A New Kind of Science），声称其开创了一种新的科学，而这个新科学的基础理论就是元胞自动机。

书中第三章介绍了包括元胞自动机在内的各种计算模型，这些所有的计算系统的行为都可以大致分为类似于元胞自动机的四个运行类别。第四章中用丰富的图形展示了元胞自动机如何模拟数字运算系统，包括四则运算、求平方根、计算微积分等等。第六章中详细讨论了元胞自动机四个运行类别的行为。第八章中进一步把元胞自动机与周围的真实世界联系起来，弹子球、纸牌游戏、布朗运动、三体问题等等问题中的随机性都可以用元胞自动机来解释；流体的湍流、晶体生长的规律、华尔街股票的涨落也都可用元胞自动机来模拟；还有自然界中的树叶、贝壳、生物色素沉着、多彩多样的花纹等，元胞自动机能生成与它们一模一样的图案和形态。第九章中作者构建了一种“保守的”、“可逆的”的元胞自动机，这种元胞自动机与物理定律的可逆性相吻合。作者认为宇宙就是一台元胞自动机，空间、时间、引力、相对论和量子力学等等都是系统涌现出来的一种结果，是这台宇宙元胞自动机所呈现出来的各种表象。第十一章中，通过作者特别证明，我们看到 110 号初等元胞自动机可以等价于图灵机和其他计算模型。第十二章，作者提出了一个猜想：计算等价性原理（The Principle of Computational Equivalence），即宇宙中几乎所有达到一定复杂程度的系统都等价于 110 号初等元胞自动机。作者认为对于第 4 类元胞自动机，我们除了运行它以外，无法对其进行长远预期。

沃尔夫拉姆的书引起了巨大的争议，但他带给科学界巨大的启发。沃尔夫拉姆曾大胆预言：“50 年内，更多的技术，将基于我的科学而不是传统科学被创造出来。人们在学习代数之前将先学元胞自动机理论”。

二、人工生命简介

朗顿发现了处于混沌边缘的元胞自动机不仅可以完成复杂的计算，而且可以支持生命和智能。正是在这样的思想的指导下，朗顿提出了他的“人工生

命”(Artificial Life)理念。1987年9月在美国圣菲研究所的支持下,朗顿主持召开了第一届国际人工生命研讨会,这次会议宣布了一门新的计算机与生物学交叉的前沿学科的诞生。自1987年至今,包括数字生命在内的人工生命研究得到了越来越多的计算机专家和生物学家的关注,出现了“生物形态”、Tierra世界、“Avida”、“阿米巴世界”等数字生命模型。

人工生命就是人造的生命,而不是由碳水化合物有机形成的自然生命。人工生命虽然没有考虑现实的以碳为基础的生命运作问题,但它一开始就从计算的视角来思考生命的本质问题。“人工生命”的学者们认为,生命的本质不在具体的物质,而在物质的组织形式。生命并不像物质、能量、时间和空间那样,是宇宙的基本范畴,而只是物质以特定的形式组织起来派生的范畴。这种组织原则完全可以用算法或程序的形式表达出来。所以,只要能将物质按着正确的形式构筑起来,那么这个新的系统就可以表现出生命。而这种所谓的“正确的形式”就是生命的算法或程序。所以,算法和程序是把非生命和生命连接起来的桥梁,是生命的灵魂。人工生命的很多研究就是通过计算机编程的方法揭示生命的本质。

人工生命研究希望展示具有自然生命特征或行为的人工系统,试图在计算机、机器人等人工媒体上仿真、合成与生物有机体相关联的一些基本现象,如自我复制、遗传、寄生、竞争、进化、协作等,试图用非生物媒介创造新的生命形式,并研究和观察“可能的生命现象”(Life-as-it-could-be),从而使人们能够加深理解“已知的生命现象”(Life-as-we-know-it)。

第六节 简单巨系统的演化理论

一、简单巨系统的特点

(一) 子系统数目多

简单巨系统首先是一个“巨”系统,“巨”体现为元素、子系统数目多;但各个子系统之间的差别不重要,可求出系统物理量的平均值。简单巨系统的层次简单,仅含有两个层次,即宏观(整体)层次与微观(局部)层次。

热力学系统是典型的简单巨系统,在热力学系统内的很多状态变量如温度(T)、压强(p)、熵(S)等均是大量分子集体运动的平均结果。在平衡时,

能从子系统（分子）的运动推导出这些热力学量。

（二）子系统之间互相作用规律简单，一般是确定性的

在多子系统组成的热力学系统中，子系统多是分子，它们之间只有分子碰撞作用。在由微观粒子组成的物理系统中，微观粒子之间也仅存在四种相互作用力，可以明确地表示出来。在化学系统中原子之间的化学作用也比较简单，一般的物理、化学系统都可以看成是简单巨系统，可以用简单巨系统的理论来研究它们的演化特点。

生物系统、社会系统是子系统相互作用的复杂系统，一般不能用简单巨系统的理论来处理它们，当生物社会子系统之间的相互作用可以认为比较简单、可以确切表达出来的时候，也能近似看成简单巨系统，应用简单巨系统的理论如自组织理论来分析它们的演化。在实际研究中，有些低等昆虫个体之间联系简单，它们只能依靠气味吸引其他个体，气味消失后，又各自独立运动，对于这类昆虫群体，可以应用自组织理论进行讨论，并得到较好结果，包括人在内的系统，由于人的行为具有不确定性，故一般不宜用自组织理论来讨论，需要运用复杂系统的演化理论，当然对社会系统作适当简化假定，用自组织理论也还可以近似分析一些具体问题。

（三）系统层次简单

一个简单巨系统由大量子系统组成，仅有两个层次，即子系统（局部）层次和系统（整体）层次。子系统直接构成系统，中间不再经过其他层次，我们可以直接利用子系统性质及其耦合特点，经过统计平均得到系统的演化方程。

一般复杂系统，往往是由部分子系统组成亚系统，亚系统再组成系统，属于不同亚系统中的子系统之间没有直接的作用。人体就是一个分成若干层次的复杂系统。细胞是组成人体的子系统，但它们并不直接组成人体，而是细胞首先构成器官，如心、肺、胃等；这些器官再组成人体各个不同系统，如胃、肠等组成消化系统，气管、肺组成呼吸系统等；人体是由这些系统组成的统一整体。不同器官如胃和肠，两个器官之间并无直接作用，它们是通过胃、肠两个器官之间的作用来联系的；而不同系统如肺和胃，它们的细胞之间，其联系就更弱了，它们仅能通过消化系统与呼吸系统之间的作用来建立联系。研究这样复杂的分层次的系统，不能用简单巨系统理论，而要采用新的理论，并且研究这些系统的演化也会碰到很多新的理论与实际问题。

(四) 外界环境对系统的影响是确定的

没有外界影响的孤立系统，其演化特点比较简单，它最终必然达到熵极大状态，在统计物理学中已经对此进行了充分的讨论。对于开放系统，由于外界环境影响，系统的演化趋势并不固定，演化特点丰富多彩，这类系统的演化是我们研究的主要问题。

外界对系统有固定的影响，可以用常量来表示它的作用，是简单巨系统的特点。在化学反应中，对系统添加反应物的数量是确定的，取出生成物的数量也是确定的，该系统虽然不断进行化学反应，但总保持其内部各种化学成分的浓度是一定数。

在外界环境变化时，系统演化一般是较复杂的，对系统产生影响的环境作周期变化是比较简单的情况。周期的外界扰动作用于系统时，经过一段时间以后，线性系统将随着外界驱动力也做周期运动。当系统自身运动规律可用线性微分方程表示时，外界环境的扰动即使不是周期扰动，只要扰动形式已知，也可以利用一般控制理论进行分析。当非线性系统受到外界周期扰动时，外界扰动将与系统自身固有运动耦合，其运动结果比较复杂，通常情况下系统会出现混沌现象。

二、描述复杂系统状态的一个重要变量——熵

经研究发现，物理学中熵概念可以被推广，并用于统一描述各类不同系统，特别是简单巨系统的共同特点，描述系统内各子系统分布的均匀性。熵概念首先在物理学中被使用，申农将它推广用来讨论信息，另一些数学家又从数学上进行规范，使之可以描写一般系统。为了确切了解熵如何成为描述复杂系统状态的一个重要变量，并掌握它与原来物理学中所定义的熵有些什么区别，我们简单来回顾一下熵概念建立的过程。

(一) 热力学熵是系统演化过程中不可逆性的一个度量

作为一个物理概念，熵最早是在热力学中由克劳修斯引入的。在热力学中熵是作为热力学系统演化过程中不可逆性的一个度量：在孤立的热力学系统，自发演化过程中，熵不可能减少，系统最终达到一个熵最大的状态。在演化过程中，两个状态之间熵变化的具体数值，由联系两个状态之间可拟等温过程中系统吸收的热量被温度除后的商值表示。

$$\Delta S = \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

热扩散过程熵公式：

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} dS = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = mc \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

物扩散过程熵公式：

$$\Delta S = \frac{dQ}{T} = \frac{dW}{T} = nR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (3)$$

(二) 玻耳兹曼熵 (统计物理熵) 是大量微观粒子组成的系统的无序性度量

$$S = k_b \ln \Omega \quad (4)$$

式中, k_b 是玻耳兹曼常数, Ω 是配容数 (宏观状态下对应的系统的微观状态数)。(4) 式是 (1) 式在一定限制条件下 (满足等概率假设和给定熵的零点) 的具体结果。这时可以把 (4) 式作为熵的定义, 它描写平衡状态下系统的某种性质, 这种性质反映系统某一宏观状态所包含的微观状态数的多少。热力学系统的一种微观状态就是分子的一种分布排列。对于系统的某一宏观状态来讲, 其包含的微观状态数多, 系统该状态的熵值高, 表明其混乱程度大, 否则, 包含的微观状态数少, 系统该状态的熵值低, 混乱程度低。若某宏观状态仅包含一种微观状态, 熵值为零, 则系统状态完全不混乱。

(三) 概率测度熵 H 是测度 (样本) 空间整体不确定性的度量

$$H = I = -k \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad (5)$$

式中, k 为比例系数, $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为每个事件出现的概率。

(四) 信息熵 I 是通信系统中信息不确定性的度量

$$I = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (6)$$

式中, I 为信息熵, p_i 为 n 个信源符号 $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 中取 a_i 的概率。

对信息熵的解释:

按在 $\sum p_i = 1$ 的约束条件下求 I 的极值:

$$f = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^n p_i - 1 \right)$$

$$\frac{\partial f}{\partial p_i} = -(1 + \ln p_i) + \lambda = 0$$

即有 $p_i = e^{\lambda-1}$ ，由 $\sum p_i = 1$ ，有 $p_1 = p_2 = \cdots = p_n = \frac{1}{n}$ ，即可得 $I_{\max}$ 。

(五) 玻耳兹曼熵（统计物理熵）与概率测度熵（信息熵）的关系

玻耳兹曼熵与信息熵都是描述系统的不确定性和无序程度的。但两者之间的差别很大：玻耳兹曼熵是指某一宏观状态下，微观分布的不确定程度；而信息熵是指一个具有概率分别为 p_i 的事件 X_i 的样本空间整体的不确定程度，只有把样本空间整体视为热力学系统的宏观状态，每个事件为各个微观状态时，两者才是一致的。

对于一个具有 n 个子系统的系统，其各个子系统的概率测度 $p_i = 1/n$ 时，则利用 (5) 式可得

$$H = S = -k \ln \Omega \quad (7)$$

当 k 取 $k_B / \lg e$ 时，(7) 式与 (4) 式一样，即玻耳兹曼熵是概率测度熵在各个子系统出现等概率时的特例。

(六) 在非平衡条件下，如果热力学系统中微观状态出现的概率不相等，组成系统的粒子形成某种分布函数 f ，则系统非平衡状态的熵为

$$S = -k_B \sum_{i=1}^n f \ln f \quad (8)$$

式中，取和号遍及系统分布函数 f 的自变量所有可能的取值（连续取值时取和号变成积分号），但注意 f 只能对一个宏观状态而言。

(七) 描写简单巨系统（子系统满足迭加原理）“整体”与“局部”之间的关系——简单巨系统熵

对于一个由 n 个子系统组成的简单巨系统，系统具有可加性的某性质 A ，其测得的总量为 X ，每个子系统测得的分量为 X_i ($i=1, 2, \cdots, n$)，它们对总量的贡献为 $p_i = X_i/X$ ，则系统关于性质 A 的熵值为

$$S = H_A = -k \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad (9)$$

因此，可以认为熵概念是从“整体”上反映系统在“局部”上的不确定程度，即每一个“宏观”状态下的系统“微观”分布的不确定性均可以用“宏观”层次的熵来描述。

(八) 演化与演化熵

当系统的某一演化的外界条件确定以后，宏观状态呈现不确定性，即宏观状态数发生变化，这种不确定性定义为系统的演化熵：

$$S_e = k \ln W \quad (10)$$

式中， k 为比例系数， W 为给定演化的外界条件下所呈现的宏观状态数。

对于宏观状态出现概率不同的演化过程，可定义 n 个宏观稳定状态出现概率为 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的演化过程，其演化熵：

$$S_e = -k \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad (11)$$

对于简单巨系统，熵概念定义保持了原来定义（热力学熵、统计物理熵、信息熵）的特点，同时又可以描述系统更一般的性质，我们认为它具有如下特点。

首先，熵是一个状态函数，是一个描写系统状态的量，它是由系统内部性质决定的，它反映系统不同状态对应的子系统分布的一种不确定性，或者说它反映了局部对整体贡献的分布情况；它主要由某一部分贡献，还是由各个局部“平均”进行贡献。系统的每一个状态对应一个确定的熵值，系统的状态发生改变，则系统状态对应熵值大小也将改变。

特别需要指出：熵与过程无关，只要两个状态确定了，熵的改变也就确定了，而与实现两个状态之间变化的过程无关。我们在讨论不同系统时，可选择不同的方式来计算熵的改变，但不论采用什么方式来分析熵改变，熵的改变也与过程无关，仅由过程始末的两个状态决定。

其次，我们要指出熵的数值具有相对性。两个状态确定以后，它们之间熵的差是确定的，但是单独指定一个状态，其熵的具体数值大小是不确定的，要确定系统熵的具体数值，必须要事前选择一个熵的零点值。一般选定了零点，每个状态熵的数值也就随之确定了。我们对简单巨系统定义的熵选择在只有一个局部对其总量有贡献，而其余部分贡献皆为零时，系统熵值为零。

第三，对于一个复杂系统，熵概念具有层次性。一个复杂系统有多个层次，子系统并不简单地直接组成一个系统，每一个子系统也不是同时以同样的形式和特点与其他所有子系统进行相互联系。所有子系统首先分别结合，形成若干个高一层次的子系统，高一级的子系统再互相结合，形成更高一级的子系

统，这样依次下去，最终组成一个具有多重层次结构的复杂系统。描写一个复杂系统的不确定性，只要状态变量具有可加性，仍可以用熵概念，但必须要指明系统中层次的选取如何进行。在多个层次中，每指定一个层次，对于其下一个层次的子系统组成就有一个不确定性，从而可以计算出一个熵值；选定系统的另一个层次，同样又可以讨论其下一个层次组成的不确定性，从而再计算出一个熵值。因此，对于有 n 个层次的复杂系统 ($n > 1$)，原则上讲，我们可以求出 $(n-1)$ 个熵值来。

三、熵对系统不同演化过程的描述

在深刻认识熵与状态之间密切联系的同时，还必须分析在系统状态变化过程中描写系统状态的熵值如何变化，因为熵值的改变对我们了解系统演化方向有着重要的作用。

系统与外界进行物质、能量的交换可以有各种形式，通过交换，系统的状态将随之发生各种改变，描写状态的变量——熵也会发生各种变化。在近平衡线性区，虽然系统也开放，也能从外界得到负熵流，但熵的变化仍有规律可循，即熵增加且增加速度越来越小，最终达到熵值增加量最小的定态。

对于远离平衡的非线性区，人们怎样努力也未找到一个量，在系统演化过程中其变化有一定方向（开始试图利用熵产生，后来又试图利用超熵产生，使其在系统演化过程中有确定变化趋势，但都未成功）。人们只好承认，在远离平衡的非线性区，无法将系统演化方向与熵或与熵有关的物理量的固定变化趋势联系起来，不考虑系统内部子系统之间的相互作用，系统在与外界交换物质、能量的过程中，系统的熵可能增加，也可能减少。

在系统内部反应过程和系统与外界交换物质、能量两种作用同时存在的情况下，系统总熵的变化也必然有两种可能：当系统与外界有相互作用，使得系统开放，由于系统与外界环境存在物质、能量交换而引起的系统的熵的改变 $d_e s < 0$ ，并且 $|d_e s| > d_i s$ 时，系统总的熵变化为熵减少；在其余情况下，系统总的熵变化都为熵增加。（ $d_i s$ 表示由于系统内部子系统相互作用，系统自发进行“反应”所引起的熵的改变）。

比利时物理学家普利高津正是基于上述热力学分析，指出要使系统达到一种低熵有序状态，并一直维持下去，必须让系统开放，必须使得系统从外界获得足够的负熵流，系统才形成并保持其有序结构。普利高津以熵值的增加或减少来分析系统演化的情况，同时结合熵的物理意义（系统熵值增加，其混乱程度加大，最终实现平衡；系统熵值减少，其有序程度加大，并在一定条件下，

可以稳定在一个有序的结构上), 可以将系统的演化分成退化和进化两个演化方向。系统进化是指系统向着越来越复杂、越来越具有功能、越来越有序的方向演化, 生物界所呈现的演化正是沿着这个方向进行, 它可由系统熵值减少来衡量。系统退化则指系统向着越来越简单、越来越均匀、越来越无序的方向演化, 它可用熵值的增加来表示。普利高津的分析得出了一个开放系统其熵值可以减少的结论, 修正了原来热力学第二定律给出的“孤立系统熵不可能减少”的对一般系统演化的片面认识。我们利用熵值可以表示系统的状态、表示系统的有序程度, 同时利用熵值随时间变化可以表示系统演化的方向和速度, 使熵不仅可以用来衡量某状态的性质, 而且它的变化也可以作为系统演化的量度, 将它与自然规律联系在一起。

用熵来表示系统的演化方向与速度时, 几个问题必须明确, 一个是熵流, 普利高津在研究非平衡系统演化时, 为了形象地说明一个系统在仅由于外界环境对其作用而熵值改变时, 引入熵流的概念, 说明系统熵值的改变好像是从外界环境有“熵”流进系统(或从系统流出去)。当然熵既不是一种物质, 也不是一种能量, 因此所谓熵流绝不是指物质流、能量流, 它仅表示其熵改变的来源在于外界环境, 而不是在于系统内部; 熵流的正负也仅仅表示由外界原因引起的系统的熵的改变是增加了还是减少了。

另一个是“负熵”问题。薛定谔(Schrodinger)在《生命是什么?》一书中研究生命得以产生和得以维持的原因时, 从热力学的角度来分析, 认为生命的维持依赖于负熵, 甚至提出生命就是负熵。在那里薛定谔丝毫没有意思要把熵分成两种: 一种是正熵, 一种是负熵, 也没有说信息就是负熵。薛定谔所谓负熵实质上是与普利高津所说负熵流一样, 都是从热力学角度, 用熵概念来讨论系统的演化。一个生命体要想维持自身, 就必须与外界进行物质、能量的交换, 也就是要吃进食物和水, 吸进氧气, 并排除各种废物和二氧化碳。与外界的这种交换, 从能量角度上看, 它使系统的能量增加, 只有这样才能补充系统在“工作”或其他生命过程中对能量的消耗, 并使之维持在一定的水平上。从系统熵变化的角度看, 系统与环境的交流一定要使系统的熵值减少, 只有这样才能抵消系统自发的、内部相互作用造成的熵的增加, 并使系统维持在一个稳定的低熵状态。与外界环境的交流最终结果要使系统的熵减少这一事实, 我们称之为系统流进负熵或用更形象的语言来说是“吃进了负熵”。负熵不是一种物质, 也不能简单地认为它像能量一样被包含在某种物质中, 人吃了这种物质就吃进了负熵, 这是完全不对的。人吃进的是食物, 食物在人体内发生变化, 引起人体状态的改变, 虽然会使人体的熵值减少, 但绝不能说某种食物中有负

熵，因为同一种食物，人吃了会使生命维持，但有些动物吃了就会破坏生命，这说明物质中并无负熵可言，只是某种食物在人体内发生作用后会使人体的熵值减少，而同样的东西在有些动物体内不会发生作用，或发生作用后不会使该动物的熵值减少而已。

再一个问题就是系统演化导致熵改变与系统的层次性有密切关系。系统演化过程中不同层次上熵的变化趋势是不同的，我们以生物圈系统为例来分析这一问题。生物圈系统是一个复杂的系统，它包含有多个层次，粗略分析（仅为我们研究的方便），可以认为由细胞组织组成生物个体，再由生物个体组成种群，众多的种群构成生物圈。对于这样复杂层次结构的系统，在不同的层次之间，系统具有不同的熵值，反映不同的结构特点；同时不同层次上熵随时间的变化也不同，反映系统的演化呈现不同的特点。下面我们从两个层次上来研究系统的演化，从由细胞形成生物个体上看，在生物演化的漫长岁月中，最开始是简单的单细胞生物，以后逐渐发展为多细胞生物，随着生物的演化，其个体变得越来越复杂了。生物个体熵值逐渐变小，熵值的减少可以反映生物个体越变越复杂，越变越有序。从由生物体组成种群这个层次上看，从生物个体演化的可能性来看，在同样的外界条件下，由种类较少的古代简单生物，形成当今世界上丰富多彩的生物世界，生物的种类增多，系统演化的不确定性增加，我们仍可以选用熵的改变来表示这种变化，反映演化结果不确定性增加这一特点，则其熵值应是逐渐增加。从这一简单例子中，我们看到在一个复杂系统演化过程中，在不同层次、不同侧面上系统的熵值变化趋势会有所不同，而且正是由不同层次之间熵的不同演化特点解释了复杂系统演化的复杂性。

第七节 CAS 理论的观点和内容

一、基本思想——适应产生复杂性

复杂适应系统 CAS (Complex Adaptive System) 理论的最基本思想可以概述如下：我们把系统中的成员称为具有适应性的主体 (Adaptive Agent)，简称为主体。所谓具有适应性，就是指它能够与环境以及其他主体进行交流，并在这种交流的过程中“学习”或“积累经验”，且根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个系统的演变或进化，包括新层次的产生、分化和多样性出现，新的、聚合而成的、更大的主体出现等等，都是在这个基

础上产生的。

什么是复杂性？复杂性是怎样产生的？

按照传统的观念，复杂性来自于系统的外部。例如，人体结构的复杂性，常常归之于外部力量（如神）的创造。行为的复杂与不可预测，也总是归之于外部的随机性干扰。这种想法可以说是由来已久，源远流长。在古代西方的传说中，日月星辰、河湖山川都是上帝创造的。在东方的传说中天地日月则是盘古用巨斧劈开了混沌分化出来的。一直到牛顿的第一推动力，仍然沿袭了这种观点。近几百年发展起来的近代科学，回答了许多以前的人类所不知道的问题，然而，对于复杂性究竟是从何而来的这个基本问题，却似乎没有什么进步。而且，由于对热力学第二定律的片面理解，人们对于发展形成了一种可以说是悲观的看法，即认为任何事物的发展都按照这样一条道路：从不对称到对称，从有结构到无结构，从有差别到无差别。一句话，从复杂到简单。显然，这种认识与丰富多彩的大千世界是完全不相容的。然而，囿于还原论的束缚，人们对于这种矛盾视而不见，仍然不得不把复杂性的来源归之于神秘的、外来的力量。

现代系统科学的发展打破了这种形而上学的看法，特别是对于自组织现象的研究，第一次引导人们从系统内部寻找复杂性的来源。这是一个十分重要的进步。然而，最初研究的自组织现象，在某种意义上还是比较简单的。普利高津的耗散结构理论讨论的是热力学系统，哈肯虽然一再试图把协同学应用于生物、社会等更为复杂的系统，但是其基本背景仍然是激光等物理学范围中的、比较简单的系统。问题在于这些系统中的元素（或个体）还是被动的、“死”的，并没有自身的目的和主动性。这就使得这一阶段的理论与方法，难以应用到生物、生态、经济、社会等领域。

复杂适应系统（CAS）理论正是在这方面向前又迈进了一大步，即把系统的成员看做是具有自身目的与主动性的积极的主体。更重要的是，CAS理论认为，正是这种主动性以及它与环境的、反复的、相互的作用，才是系统发展和进化的基本动因。这样一来，我们就不必再到系统之外去寻找那个神秘的第一推动力，宏观的变化和个体分化都可以从个体的行为规律中找到根源。霍兰德把个体与环境之间这种主动的、反复的交互作用用“适应”一词加以概括。这就是CAS理论的基本思想——适应产生复杂性。

关于这个基本思想，有以下四点需要强调说明。（1）主体（Adaptive Agent）是主动的、活的实体。这点是CAS和其他建模方法的关键性的区别。正是这个特点，使得它能够用于经济、社会、生态等其他方法难以应用的复杂

系统。(2) CAS 理论认为,个体与环境(包括个体之间)的相互影响、相互作用,是系统演变和进化的主要动力。以往的建模方法往往把个体本身的内部属性放在主要位置,而没有对个体之间,以及个体与环境之间的相互作用给予足够的重视。这个特点使得 CAS 方法能够运用于个体本身属性极不相同,但是相互关系却有许多共同点的不同领域。(3) CAS 不像许多其他的方法那样,把宏观和微观截然分开,而是把它们有机地联系起来。它通过主体和环境的相互作用,使得个体的变化成为整个系统变化的基础,统一地加以考察。(4) 基于 CAS 理论的建模方法还引进了随机因素的作用,使它具有更强的描述和表达能力。考虑随机因素并不是 CAS 理论所独有的特征。然而 CAS 理论处理随机因素的方法是很特别的,其集中表现为遗传算法 (Genetic Algorithm)。一般地,常见的考虑随机因素的方法是引入随机变量,即在变化的某一环节中引入外来的随机因素,按照一定的分布影响演变的过程。这种方式中,随机因素的作用是“暂时”的,只在一个特定的步骤上起作用。它只是通过其对系统状态的某些指标产生定量的影响。在这种影响过后,事物只是在状态参数上有所变化,而运作的规律、内部的机制并没有质的变化。形象地说,系统不会因此而“进化”。显然,这正是前面所说的,把系统的元素看做“死”的对象所导致的局限性的表现。而遗传算法的基本思想在于:随机因素的影响不仅影响状态,而且影响组织结构和行为方式。“活的”具有主动性的个体会接受教训,总结经验,并且以某种方式把“经历”记住,使之“固化”在自己以后的行为方式中。正因为这样,CAS 理论提供了模拟生物、生态、经济、社会等复杂系统的巨大的潜力,明显超越了以往一般的随机方法。

二、CAS 理论的基本概念

具有适应性的主体是 CAS 理论的基本概念。但单独用主体这个概念无法完全表达出 CAS 理论的丰富内容,所以围绕主体这个最核心的概念,霍兰进一步提出了研究适应和演化过程中特别要注意的 7 个概念:聚集、非线性、流、多样性、标识、内部模型和积木。在这 7 个概念中,前 4 个是个体的某种特性,它们将在适应和进化中发挥作用,而后三个则是个体与环境进行交流时的机制。

(一) 聚集 (aggregation)

在 CAS 中,聚集有两个含义。聚集的第一个含义是简化复杂系统的一个标准方法,即把相似的事物聚合成类,如树,汽车,银行。

聚集的第二个含义是指主体通过“黏合”形成较大的更高一级的主体，即介主体（meta-agent）。而且，介主体能够进行再聚集，产生“介介主体”，这个过程重复几次之后，可以产生 CAS 非常典型的层次组织。此外，由于主体具有这样的属性，它们可以在一定条件下，在双方彼此接受时，组成一个新的个体——聚集体（aggregation agent），在系统中像一个单独的主体那样行动。可以看出聚集的第二个含义不是简单的合并，也不是消灭个体的吞并，而是新类型的、更高层次的主体的出现。

聚集涉及较为简单的主体的聚集的相互作用，这样便涌现出复杂的大尺度行为。例如，单个蚂蚁的适应性很差，环境一变，就只有死路一条，但蚂蚁的聚集——蚁巢表现出极高的适应性；产业集群中每一个中小企业的适应性很差，不能很好地应对市场中的变化，但产业集群本身却表现出了对市场的极好的适应性。

CAS 理论认为，在复杂系统的演变过程中，较小的、较低层次的个体通过某种特定的方式结合起来，形成较大的、较高层次的个体，这是一个十分重要的关键的步骤，这往往是宏观形态发生变化的转折点。

事实上，第二种含义下的聚集是所有 CAS 的一个基本特征，且由此所产生的涌现现象，正是 CAS 最激动人心，同时也是最令人捉摸不透的一面。对 CAS 的研究就是要识别出能使简单体形成具有高度适应性的聚集体的机制。此外，是什么“边界”区分这些适应的聚合类的？主体的相互作用在这些“边界”内是如何被引导和协调的？这些相互作用产生的行为是如何超越单个主体的行为的？这些问题都是 CAS 研究要回答的。

（二）标识（tag）

在聚集体的形成过程中，标识机制在起作用。商标、企业图标甚至品牌形象代言人都是标识。标识的作用在于区别主体。聚集体的形成或者说主体的聚集都是有选择的，并非任意个体都会聚集。标识的作用在于促进主体的选择性的相互作用。

例如，经济生活中厂商之间的交互是建立在标识基础上的、有选择的相互作用。所以说为了相互识别和选择，个体的标识在个体与个体，个体与环境的相互作用中是十分重要的。

标识是 CAS 系统普遍存在的特性，它让主体在一些主体或目标中去选择，良好的基于标识的相互作用为筛选和合作提供了合理的依据。标识是隐含在 CAS 中具有共性的层次组织机构背后的机制。

(三) 非线性 (non-linearity)

非线性是指个体自身属性的变化以及个体之间的相互作用并非遵从简单的线性关系。特别是在和系统或环境的反复交互作用中，这一点更为明显。CAS理论认为个体之间、个体与环境之间的相互影响不是简单的、被动的、单向的因果关系，而是主动的“适应”、互动的、甚至是互为因果的关系，其中各种反馈作用（包括负反馈和正反馈）交互影响，互相缠绕，也正因为这样，复杂系统的行为才会如此难以预测；也正因为这样，复杂系统才会经历曲折的进化过程，呈现出丰富多彩的性质和状态。

CAS理论把非线性的产生归之于内因，归之于个体的主动性和适应性，这进一步把非线性理解为系统行为的必然的、内在的要素，从而大大丰富和加深了对于非线性的理解。正因为如此，霍兰在提出具有适应性的主体这一概念时，特别强调其行为的非线性特征，并且认为这是复杂性产生的内在根源。

(四) 流 (flow)

在个体与环境之间存在物质、能量和信息流。CAS理论认为这些流的渠道是否通畅，周转迅速到什么程度，都直接影响系统的演化过程。

{节点，连接者，资源}的三合一组合是流的一种典型的表示方法。如中枢神经系统的{神经细胞，神经细胞的相互连接，脉动}；生态系统的{物种，食物网，生化作用}；互联网络的{计算机站，光缆，消息}等等。一般来说，节点是处理者，即“主体”，而连接者则表明可能的相互作用。在CAS中，节点和连接会随着主体的适应或不适应出现或消失。因此，无论是流，还是网络，都在随时间的流逝和经验的积累而反映出其不断变化的适应性模式。

流在经济学中有两个重要特性，对所有CAS都很重要。一个是乘数效应，乘数效应是网络 and 流的主要特性，无论资源的特质是什么，货物、货币或消息，都是如此。当我们要估算一些新的资源的效应时，乘数效应都是相关的。另一个是再循环作用，相同的原材料输入，由于再循环在每个节点会产生更多的资源，因而增加输出。

CAS理论认为流的渠道是否通畅，周转迅速到什么程度直接影响系统的演化过程。所以，复杂适应系统的理论把对于各种流的分析，当做一个值得注意的重要问题。

(五) 多样性 (diversity)

CAS 理论认为, 在 CAS 系统中, 多样性既非偶然也非随机。因为系统中任何单个主体的持存都依赖于其他主体提供的环境。用生态学的观点看就是, 每个主体都安顿在由以该主体与其他主体相互作用所限定的生态位上 (niche)。主体的持存要求一个完善协调的生态环境。如果我们从系统中移走一种主体, 产生一个“空位”, CAS 系统就会做出一系列的适应性反应, 产生一个新的主体来填补空位, 并且通常新的主体会占据被移走的主体的相同的生态位, 并提供大部分失去了的相互作用。

CAS 理论认为, 多样性产生的原因在于适应过程中, 是一种动态模式, 具有持续性和内聚性。例如, 当主体的蔓延 (如一个新物种到达一片它从未到过的处女地, 再如, 新企业在一地的诞生等) 开辟了一个新的生态位, 产生了可以被其他主体通过调整加以利用的新的相互作用的机会时, 多样性也就产生了。再如, 由于部分主体的绝种而引起主体间相互作用模式变动以后, CAS 常常会按以前的方式重塑自己, 但是新的主体很可能在细节上与老的有所不同, 由此, CAS 中看到的多样性是不断适应的结果, 而每一次新的适应都为系统内进一步的相互作用和新的位置开辟了可能性, 由此, 多样性是一种动态模式, 具有持续性和内聚性。

CAS 系统与其他系统的最重要区别在于组成 CAS 系统的主体的多样性。CAS 系统的多样性的形成与“流”有密切关系。具体而言, 参与循环流的主体使得系统能够保留资源, 这样保留的资源可以被进一步利用, 它们将提供新的生态位以便被新的主体所使用。在 CAS 中, 能够开发利用这些 (新生态位) 可能性的部分, 特别是能进一步增强再循环的部分, 将会繁荣, 而做不到这一点的, 将会渐渐丧失它们的资源。这是自然选择, 它是一个通过增加再循环, 导致增加多样性的过程。

把非线性的思想加进来, 可以进一步扩大视野。由形形色色主体的聚集行为所引发的资源再循环可比个体行为的简单总和要多得多。鉴于此, 用聚集去促进单个主体的演化是困难的。我们将会发现, CAS 不会安顿于少数几个能够利用所有机会的高度适应性类型, 应促进主体间的资源的循环。

(六) 内部模型 (Internal Model)

主体复杂的内部模型是主体适应性的内部机制和精髓, 主体的内部模型是主体在适应过程中逐步建立的。主体在适应过程中接受外部刺激, 作出反应, 合理调整自身的内部结构。最终, 结构的变化, 即内部模型, 必须使主体能够

就像人往往通过将复杂问题分解成若干简单部分进行理解一样，CAS 内部模型用搭积木的方法对已测试过的规则进行组合，产生新问题的处理规则，已有的规则被形象化地称为积木块，它们是新规则产生的基础。

如图 3—17 所示，有个人不走运，“驾驶着一辆红色的奔驰车在高速公路上车胎漏气了”。大多数人没有驾驶过奔驰车，更不用说开着奔驰车的时候轮胎漏气了，但人们都会做出适当的反应，这个反应就是人们可以把情况分解为熟悉的部分，然后进行组合，产生适当的反应。

IF	THEN
驾驶着一辆红色奔驰车在高速路上开胎漏气了	减速,拖入故障道 换备用轮胎

与用积木作为规则的情形比较

IF 标识	特性				THEN 行动
⋮					
	进行	条件	运动	...	
汽车	#	#	刹车		刹车
汽车	#	轮胎漏气	移动	#	减速
汽车	#	油量不足	停车	#	熄火
⋮					
	道路类型	汽车条件	路标		
道路	#	好	无		以限速继续行驶
道路	#	停车信号	#	#	准备停车
道路	X 路	漏气	#	#	拖入故障道
⋮					
	大小	膨胀情况	...		
轮胎	#	漏气	#	#	换备用轮胎
轮胎	小	不足	#	#	用打气泵
⋮					
⋮					

图 3—17 新规则的产生

CAS 理论认为主体的适应性由（组成主体内部模型的）规则发现产生。情况如上例。当主体（如企业）遇到情况时，主体总会使用经过检验的规则（如知识、经验）产生新的“貌似正确”的、即将接受检验的规则。

三、个体怎样适应和学习

在这些概念的基础上，霍兰通过以下三个步骤，建立了他所定义的具有主动性的主体的基本模型。

第一步：建立行为系统的模型（Performance system）

第二步：确立信用分赋值的机制（Credit assignment）

第三步：提供规则发现的手段（rule discovery）

模型的目标是要用一种统一的方式来表达各种系统中的主体。行为系统是个体的构架，称为刺激—反应模型。它包括二进制的探测器和反应器，分别用来接受输入和产生输出；但是它的核心在于规则的产生和调整。在上述第 2 条和第 3 条中反映出来。

（一）建立行为系统的模型

例如，一只青蛙看到小虫飞过，便伸出舌头去捕食。这里的刺激就是“小物体靠近”，而反应则是“伸出舌头”。类似地，对于“大物体靠近”的反应则可能是“逃避”。按照现代信息处理的一般思路，这里的规则，包括条件和反应，都可以表示为字符串，如在第一位用 0 表示没有物体靠近，而用 1 表示有物体靠近，在第二位分别用 0 和 1 表示小物体和大物体。这样一来，上述第一个刺激就可以用“10”表示，而第二个刺激则表示为“11”。同样，反应也可以通过编号和二进制表示为字符串。把两个字符串连起来，前半段是条件，后半段是反应。用遗传算法的说法，这就是“染色体”（Chromosome），如图 3—18 所示。每个主体内部都存储着许多条这样的规则，规则越多越细，个体的行为就越精巧。

刺激 C (STIMULUS)		反应 M (RESPONSE)	
规则：IF	（小物体靠近）	THEN	（捕食）
IF	（大物体靠近）	THEN	（逃避）
字符串：	10.....	01.....	
	11.....	10.....	

图 3—18 染色体的表示方法

这里涉及以下几个概念：

- 输入——环境（包括其他个体）的刺激
- 输出——个体的反应（一般是动作）
- 规则——对什么样的刺激，做出怎样的反应规则
- 探测器——接受刺激的器官
- 反应器——做出反应的器官

它们之间的关系及消息流如图 3—19 所示。

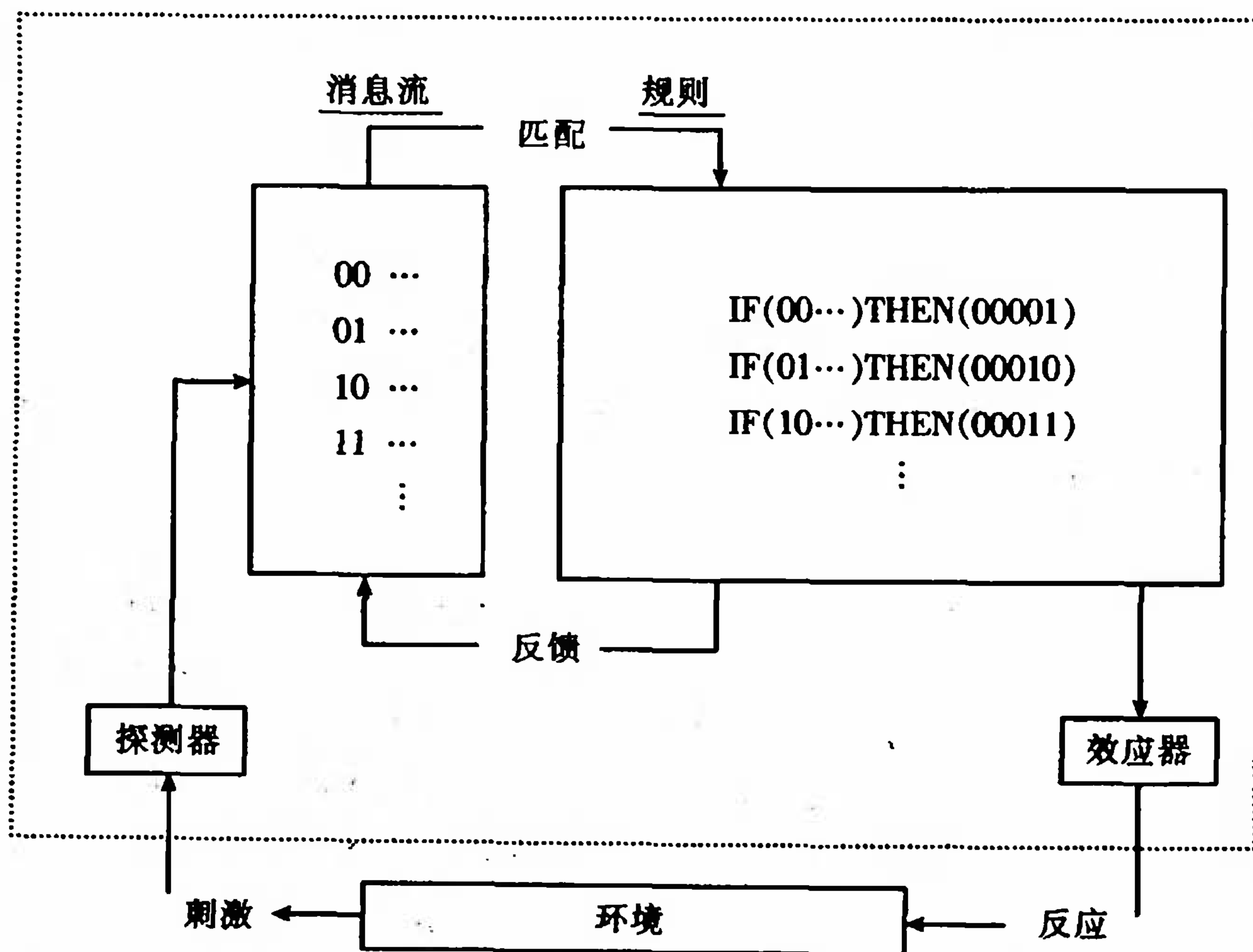


图 3—19 刺激—反应行为系统

关于行为系统有两点说明：

(1) 行为系统说明了主体在某个时刻的能力。行为系统的三个主要部分：探测器、IF/THEN 规则集合和反应器。探测器代表了主体从环境中抽取信息的能力，IF/THEN 规则代表了处理这些信息的能力，而反应器则代表了它反作用于环境的能力。这三种元素都是抽象的，已经剔除了特定机制的细节，所以可应用于不同种类的主体。

(2) 规则（或按遗传算法称为染色体）应当足够多而且有选择的余地，它们之间不但可以，而且需要有矛盾和不一致。一般的“IF... THEN...”认为，所有的规则都应当互相一致，既不重复（每一个刺激只有一种确定的反应）也

不遗漏（每一个刺激必然有惟一的一条规则与之相对应），否则就是有矛盾，系统就被认为是处于错误的状态。其实这些规则只是有待于测试和认证的假设。进化的过程正是优胜劣汰各种候选规则的过程。信用分赋值的任务便是在这些规则之间进行比较和选择，进而进行淘汰的机制。

（二）建立信用分赋值机制

为了对规则进行比较和选择，首先要把假设的信用程度定量化，为此我们给每一条规则一个特定的数值，称为强度（Strength），或者按照遗传算法的名称，称之为适应度（Fitness）。每次需要使用规则的时候，系统按照一定的概率选择，具有较大强度或适应度的规则有更多的机会被选用。在这个基本算法的基础上，还可以加入并行算法和缺省层次等思想，使得规则的选择更加灵活，更加符合现实的系统行为。

信用分赋值的本质是向系统提供评价和比较规则的机制。当每次应用规则之后，个体将根据应用的结果修改强度或适应度。这实际上就是“学习”或“经验积累”。

信用分赋值有两种情况：（1）当系统因某个行为产生直接的赢利（奖赏、增援）时，给这个行为打分相对比较容易。（2）当行为系统同时有很多规则起作用时，或者现在行为的结果显现出来前要经过很长一段时间，信用分赋值就变得尤为复杂。它非常像象棋里的开局让棋法。在不能一目了然的情况下，一个主体如何确定哪些规则有帮助作用、哪些规则有阻碍作用呢？CAS理论借用经济生活中的竞争和资本间的一般联系，把每个规则看成是买卖消息的生产商（代理商、经纪人）。规则的“供应商”是那些满足条件发送消息的，规则的“消费者”是那些作用于消息的。规则的实力看做是手头的现金；也就是说，它的实力由现金而定。当一个规则卖了消息，它的实力就会由买者所付的钱数增加。

通过拍卖出价的过程引入竞争。只有条件满足的规则才有资格出价，且只有胜者有权利发出（“卖出”）消息。一个规则出价的多少由其实力而定。实力强的出价高。然后，胜者付钱给供应商；输者什么也不付。

赢了之后，胜者实力减弱，供应商实力增强。但是，胜者已经有权利发送消息，或许它们也会有消费者出价并付钱。在这种情况下，只有当消费者付的钱比第一次的出价多，赢的规则才会发展壮大。老资本家都信守这条格言：便宜买入，高价卖出！具体过程被称为传递队列（bucket brigade）算法，它会加强那些旨在最终获得好处的系列行为的规则。处理过程是在循序渐进地对布局和子目标假设进行确认。对于在统计意义上规范的环境来说，数理经济学的

定理能够证明这个结果，并且，计算机模拟也表明，它在多种环境里都行得通，特别是与规则的发现过程组合起来的时候。

(三) 提供发现规则的手段

经过与环境的对话与交流，已有的规则就能够得到不同的信用指数。在这个基础上，下一步的要点就是如何发现或形成新的规则，从而提高个体适应环境的能力。

这里的基本思想是，在经过测试后比较成功的规则的基础上，通过交叉组合 (crossover)、突变 (mutation) (见图 3—20) 等手段创造出新的规则来。需要注意的是，由于在这里是基于经验来进行新规则的创造，所以比纯粹根据概率去查找和测试一切可能性要快得多，效率也高得多。

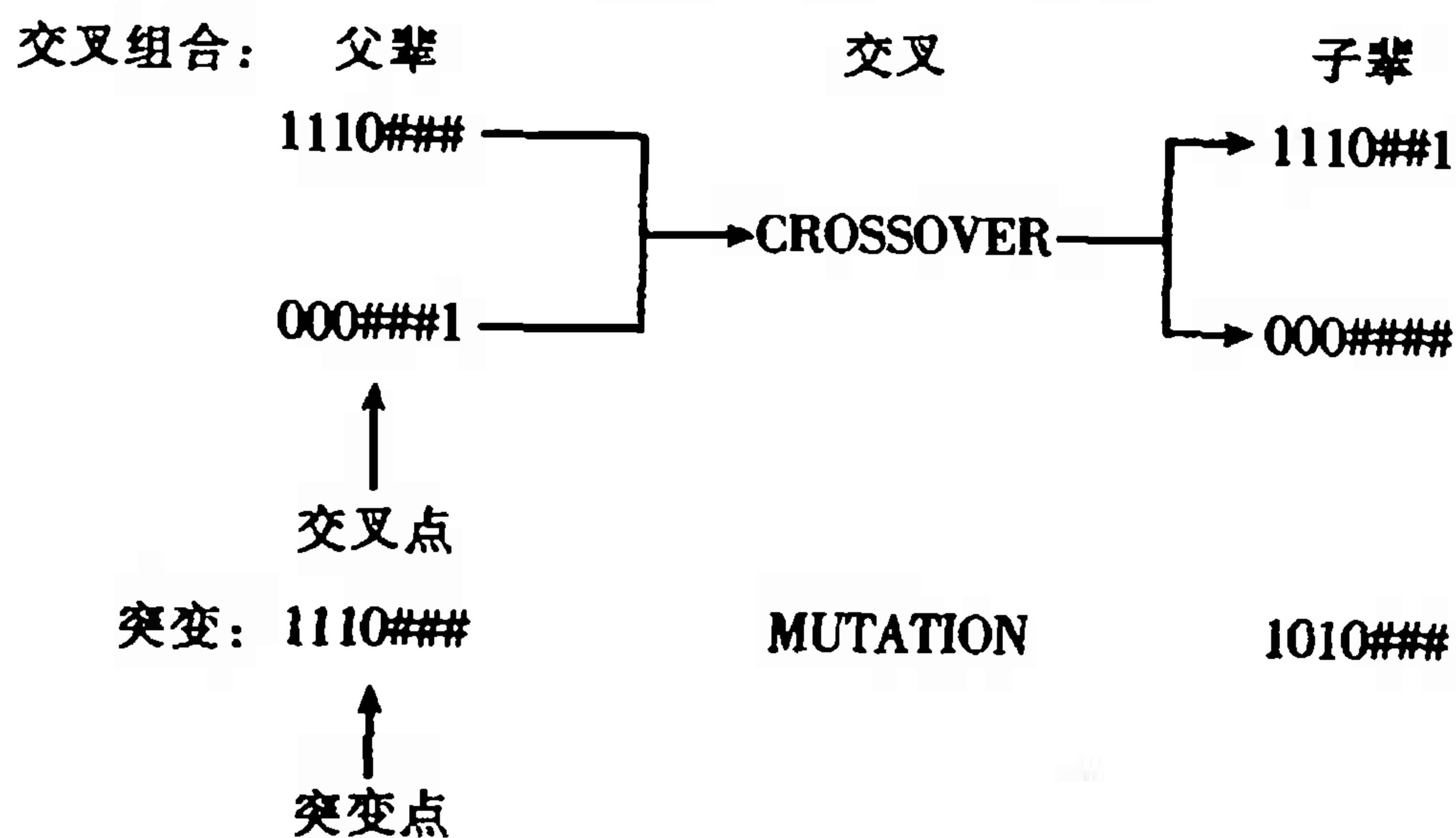


图 3—20 交叉组合与突变

规则发现，即合理假设的生成，集中在经过测试的积木块的使用上。过去的经验会直接体现出来，同时创新有着广阔的空间。这种积木块重新组合的特殊方法在遗传学上用得很多，但任何一个具有普遍性的过程都可以用这种方法抽象出来。用积木块的思想，我们甚至可以描述神经生理学的理论。

在神经生理学的理论中，细胞集合就是几千个相互交叉的能够自保持回响 (self-sustained reverberation) 的神经元集合。一个细胞集合的运行有点像通过普通标志结合在一起的小规则簇。多个细胞集合的行为是并行的，通过大量的触处广泛地传播消息 (脉动) (所谓触处，就是神经元连接的地方——一个神经元可能会有上万个触处)。细胞集合通过招募新兵 (加入其他细胞集合的部分) 和分化瓦解 (分成作为后代的片段) 竞争神经元。我们很容易把这个过程看成是经过测试的积木块重组。此外，多个细胞集合可以集成为叫做相序列 (Phase sequences) 的大结构。事实上，在各种不同类型的问题领域中，不难

发现极其相似的东西。

标志在规则的结合和提供后续活动方面起着非常重要的作用。请注意，它们也有积木块。标志实际上就是出现在规则的条件和运作部分的模式。这样看来，它们的操作就与规则的其他部分一样了。已经确认的标志——在强规则中发现的那些——会育出相关的标志，提供新的结合、新的簇和新的相互作用。标志总是试图通过缺省的层次，向内部模型的框架加入新鲜血液（相关的事物），以此来丰富内部模型。

四、从微观到宏观——ECHO 模型的建立

现在我们从微观转向宏观，在前面所定义的主体模型的基础上，建立整个系统的模型，霍兰称之为回声模型——ECHO 模型。

从微观到宏观的过渡，历来是一个难题。不只在系统科学中，而且在经济学中（微观经济学和宏观经济学），在生物与环境科学中（生物个体与生态系统），在社会科学中（心理学与社会学）都存在着这样的问题。现在，我们在前面建立的具有适应性的主体模型的基础上，建立由这样的个体组成的复杂系统的模型。

我们已经讲过，传统科学在这个问题上的偏颇主要表现在以下两个方面，一方面，往往忽视层次之间的质的差别，总是试图用一个固定的、统一的模式去套不同层次的问题，或者简单地把宏观的、系统的属性当做统计规律看待；另一方面，把两者完全割裂开，切断它们之间的有机的联系，如在经济学中长期把微观经济学和宏观经济学截然分开，回避其间的矛盾和不一致之处。

我们仍然分三步走，首先定义资源和位置（Site），然后提出一个基本模型，在此基础上补充一些更复杂的属性，形成最终的模型。

首先是资源，资源的意义十分广泛。例如，现实生活中的水井或泉水，它可以不断地向主体提供所需要的某种物质或能量。类似地，在经济系统中，银行就起着提供资金的作用。

另一个概念是位置（site）。我们可以用城市去理解它。它是一个可以容纳若干个体活动的“容器”，具有一定的环境条件与资源条件，例如“温度”、“服务水平”等。个体可以在位置之间移动和选择。各个位置之间还有“距离”等概念。这就像一般计算机模拟中的环境参数一样。

这样一来，为了构筑宏观系统的模型，除了主体之外，又定义了资源和位置。这几个概念相互结合，就形成了下面说的回声模型。

(一) 一个最基本的 ECHO 模型

基本的 ECHO 模型：在这个基本模型中，主体具有最简单的功能——寻找交换资源的其他主体，与其他主体进行资源交流，保存及加工资源。

为此，主体要有三个基本部分：

主动标识 (offence flag) ——用于主动地与其他主体联系和接触。

被动标识 (defense flag) ——用于其他主体与自己联系时决定应答与否。

资源库 (reservoir) ——用于存储的加工资源。

这样，这个主体的基本情况就如图 3—21 所示。

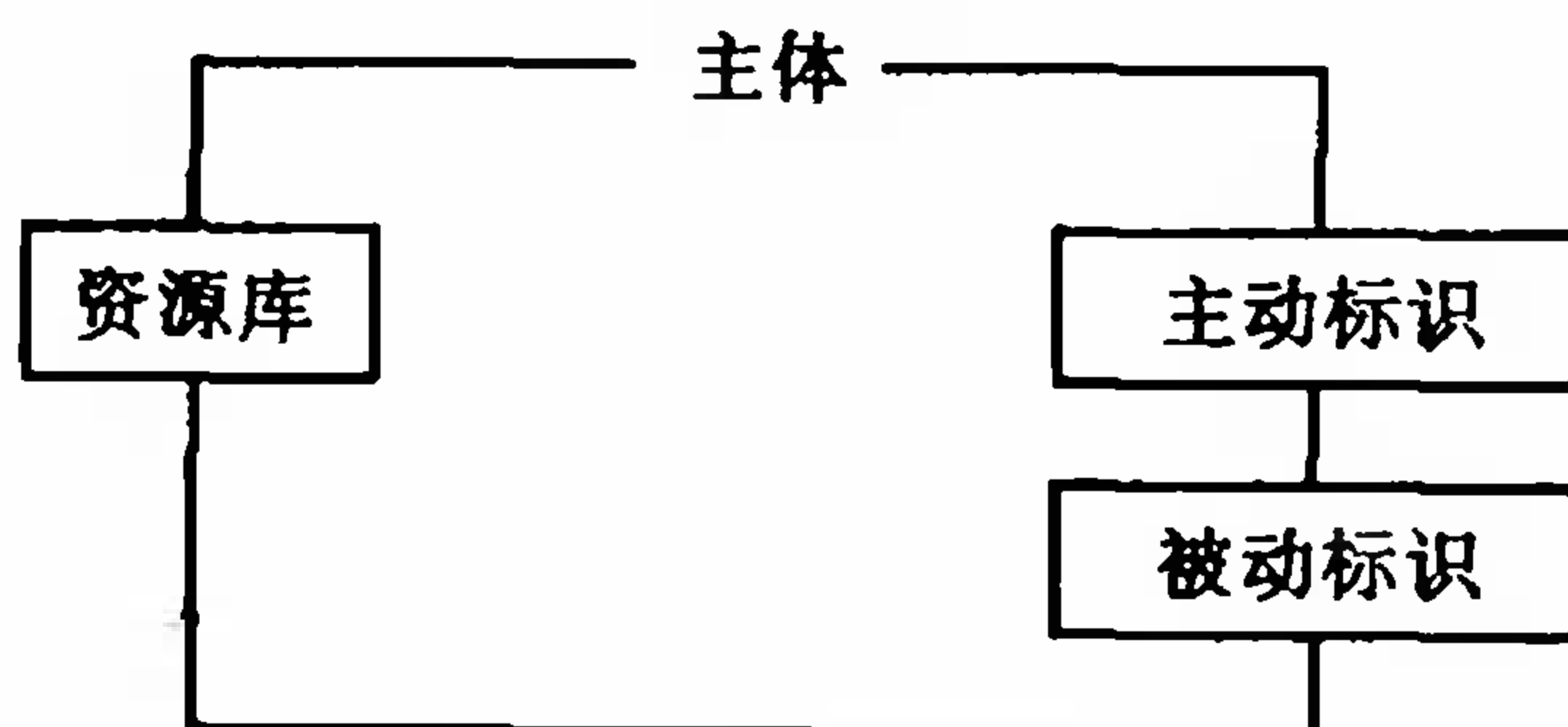


图 3—21 ECHO 模型中主体的基本模型

它们功能包括：主动与其他主体接触，同时也对其他主体的接触进行应答，如果匹配则进行资源交流，在自己内部存储与加工资源；如果资源足够，则繁殖新的主体。

在此基础上，整个 ECHO 模型成为这样：

- 整个系统包括若干个位点 (SITE)；
- 每个位点中有若干个主体和资源泉；
- 主体之间进行交往，交流资源和信息。

在回声模型中，资源与位置是个体的生存空间。回声模型的“地理”是由一组互相连接的位置指定的。位置是一个可以容纳若干个体活动的“容器”，具有一定的环境条件与资源条件。每个位置有一个资源泉，它指定了该位置在每一个时间步的资源值。每个位置的资源值并不相同，可以是零或更多。一组可“更新”的资源则奠定了回声模型的基础。对这组资源的处理相当抽象：资源是用字母表示的。比如，用 $[a, b, c, d]$ 代表四种资源，回声模型中的任何东西都是通过把这些资源组合成字符串构造的。

回声模型中，主体由两部分组成：存放所收集资源的资源库 (reservoir)，由资源字母组成；表示能力的“染色体”串，它只指定两个标志：进攻标志和防御标志。一个主体获取的资源的能力与它的进攻标志和其他主体或位置的防

御标志的匹配程度成正比。它防守资源的能力则与其防御标志和其他主体的进攻标志的不匹配程度成正比。

ECHO 模型的关键在于规定了：一个主体只有在收集了足够的资源能够复制其染色体串的时候才能繁殖。主体的适合度，即繁殖后代的能力，隐含在资源收集能力中。因此这个 ECHO 模型中主体的主要活动就是和其他主体进行资源交换活动。而模型中所有的相互作用都受上述两个标志的调节。

当两个主体在一个位置相遇，一个主体的进攻标志与另一个主体的防御标志进行匹配比较。如果一个主体的进攻标志和另一个主体的防御标志非常匹配，那么，它就能获取对方大部分资源，甚至可能获取对方染色体上的资源（从而杀死对方）。否则这个主体只能获得对方资源库中很少一部分资源，或者一无所获。当资源积累到足够的程度，就进行繁殖。

（二）扩展的 ECHO 模型

1. 目的

层次结构是所有 CAS 的一个普遍特征。研究各种复杂层次结构的产生方式是 CAS 理论研究的一个重要课题。扩展的 ECHO 模型就是应这个课题提出来的。

让我们具体看一个例子。多细胞动物的胚胎形成过程是一个受精卵持续分裂直到产生一个成熟的多细胞组织，而这个组织又继续产生受精卵的过程。成熟的多细胞动物如哺乳动物的结构，复杂得难以置信，它包含一些复杂的层次结构的副产物如神经网络、免疫系统、眼睛等等。解剖学家会告诉你只有理解了它们在多细胞动物中的起源和发展，才能真正理解这些结构。对于其他 CAS 也是这样。然而不管是纽约城还是热带森林，即使我们能理解它的起源和发展方式，也只是理解了若干“时间模式”中的一个。

ECHO 模型因此旨在模拟个体的生长过程，比如从种子类原生体逐渐变成一个组织有序的复杂聚合体的过程。因此霍兰在他的基本 ECHO 模型之上，又扩展了如下功能，便于描述复杂的系统行为和层次结构的产生过程。

2. 扩展模型增加的功能

（1）增加“相互作用条件”的概念，即在进攻标志与防御标志相符合的条件之外，还要加上相互作用条件。两个主体并不是只要相遇就可以进行交互作用，还要看是否符合相互作用条件。

（2）增加“资源转换”的概念，即主体具备加工，利用和重组资源的能力。主体被赋予了把一种资源转换成另一种资源的能力，比如把多余的资源转换成繁殖需要的其他资源。增加这一功能为主体的分工和专门化奠定了基础。

(3) 增加“黏着”(adhesion)的概念。黏着提供了一种形成多主体聚合体的方法。主体之间选择性地相互黏着,甚至形成“层次”,最后它们作为一个整体移动和进行相互作用。聚合体中的单个主体通过代代相传,可以逐渐适应,并充分利用聚合体中其他主体提供的特定环境。聚合体中一个主体可以专职于进攻或防御,而另一个主体则专职于获取资源。如果这两种主体交换合适的资源,那么聚合体和主体都将会更有效地收集和保护资源,从而加快繁殖速度。可以说“黏着”为功能分化的形成提供了条件。黏着标志和边界都是用来限制主体间的相互作用的。

(4) 增加“选择交配”(Selective mating)的概念,即主体可以有选择地与其他主体结合,通过交叉组合形成新的更强的主体。配偶的选择是需要一定条件的,比如 1) 可以繁殖(有足够资源), 2) 存在于给定主体的相互作用域之内。如果两个主体的选择性交配条件都得以满足,交配就继续进行。“父母”使用它们资源库中的资源,为染色体制作拷贝。这些染色体拷贝进行交叉繁殖,发生突变,最后在该位点增加后代。

(5) 增加“条件复制”的功能。从单细胞进化而来的多细胞动物中拥有各式各样的细胞类型,然而所有这些类型细胞的染色体都是一样的。CAS 理论认为这是因为染色体上的各个基因是可以“开”和“闭”的。不同的基因处于“开”的状态,就会产生不同的酶和不同的反应,从而形成不同的结构。同一染色体上不同基因的行为使多细胞动物在成长过程中表现出了组织扩展和多样性。因此,一个组织就会拥有不同的细胞如神经细胞、肌肉细胞和血细胞等等,虽然这些细胞拥有同样的染色体。这种代代相传的复制产生了多样性。

增加了这些功能的主体模型就比较复杂了。模型中的主体,其染色体包括两个部分:标志片段和控制片段。染色体为主体提供三个标志、三个相互作用条件、一种资源转换的能力和一种控制主体处于活动或不活动状态的方法。

标志片段包括三个标志:进攻标志、防御标志和黏着标志。两个主体相互作用的时候,一个主体的进攻标志与另一个主体的防御进行匹配比较,以决定两个主体之间交换的资源数量。进攻标志还用于限制条件交换、配偶选择和条件复制相互作用。黏着标志则用来决定两个相互作用主体之间的黏着程度。

控制片段包括三个对象:条件、资源转换和一个活动标志。

(1) 条件有三个:一个交换条件,一个交配条件和一个复制条件。每当两个主体配对进行相互作用时,一个主体的每个条件都会检查另一个主体的染色体中的进攻标志,以决定相互作用是否继续进行。

(2) 资源交换的次数可以是任意值。每次都指定一个源资源和目标资源;如

果资源库中有相应的资源，就会通过资源转换，以一定速度转换成目标资源。

(3) 控制片段中有一个标志。如果标志为“1”，多主体就会使用该主体的标志来调节其相互作用；否则多主体就会忽略主体的存在，好像这个主体并不存在于多主体这个聚合体中。

(三) ECHO 模型的模拟

在前面介绍的对回声模型的基础机制和相互作用描述的基础上，CAS 理论还研究了怎样使扩展的 ECHO 模型运转起来，模拟组织出现的过程，即若干独立自由的主体怎样进化成多主体，又怎么从这个种子类原生体变成有若干多主体的一个特定的聚合体。但这个 ECHO 模型还未得到全面的验证，较多地停留在理论阶段。

在这个模拟研究中，CAS 理论提出了两层结构理论。底层主要研究不同种类主体之间的资源交换。上层‘负责’主体的进化，它使用遗传算法改变后代的结构。数学中的两个进展对此有帮助。一个是基于方程集的动力学理论，这个方程集的势随时间而改变。另一个理论把构件与层次结构、策略以及这些策略的“值”联系在一起。具体请参阅霍兰的《隐秩序》。

ECHO 模型有着明显的经济、生物、生态领域的背景和影响。所以 CAS 理论的研究并不是纯理论的思考的产物，而是在大量现实的复杂系统的考察与研究的基础上逐步抽象出来的。然而 CAS 仍然是正在形成中的一种理论，它还需要进一步完善，以期成为描述和模拟复杂系统的、更有用的工具和手段。

第八节 复杂网络结构研究与社会网络分析

一、规则网络和随机网络

我们把一维链、二维正方晶格等称为规则网络。规则网络是指平移对称性晶格，任何一个格点的近邻数目都相同。随机网络是另一个极端，由 N 个顶点构成的图中，可以存在 C_N^2 条边，我们从中随机连接 M 条边所构成的网络就叫随机网络。还有一种生成随机网络的方法是，给一个概率 p ，对于 C_N^2 中任何一个可能连接，我们都尝试一遍以概率 p 的连接。如果我们选择 $M = pC_N^2$ ，这两种随机网络模型就可以联系起来。对于如此简单的随机网络模型，其几何性质的研究却并非同样简单。

规则网络与随机网络的典型几何性质包括：度分布，平均集聚程度与平均最短距离。规则网络所有顶点都相同，因此其度值相同，度分布为 $\delta(k-k_0)$ ，其平均集聚程度也只需要在一个点计算 $C = \langle C_v \rangle = C_v$ ，其最短距离可以也只从某一个顶点开始计算从它到所有其他顶点之间的距离之和 $L \sim N^2$ ，然后计算其平均值 $d = \frac{L \times N}{2 \times C_N^2} \sim N$ 。对于随机网络 $G(N, p)$ ，包含了从空图到完全图的所有可能情况，因此随机图的几何性质需要对每一种可能图做平均，例如我们计算每一种可能图的最短距离，然后按照各自出现的几率平均。研究结果表明随机网络顶点的度值符合平均值为 p_N 的泊松分布，其集聚程度约等于 p ，最短距离 $d \sim \ln(N)$ 。

对比规则网络与随机网络，我们发现，平均集聚程度与平均最短距离，这两个静态几何量能够很好地反映规则网络与随机网络的性质及其差异。规则网络的特征是平均集聚程度高而平均最短距离长，随机网络的特征是平均集聚程度低而平均最短距离小。规则网络的平均最短距离 $d \sim N$ ，而其集聚程度依赖于近邻数目 k_0 。例如，在如图 3—22 所示的规则网络中， $k_0 = 4$ ，集聚程度为 0.5。而在随机网络中，平均集聚程度非常小，在图 3—22 所示的随机网络中，顶点数与边数都与规则网络相同，但集聚程度为 0.02。

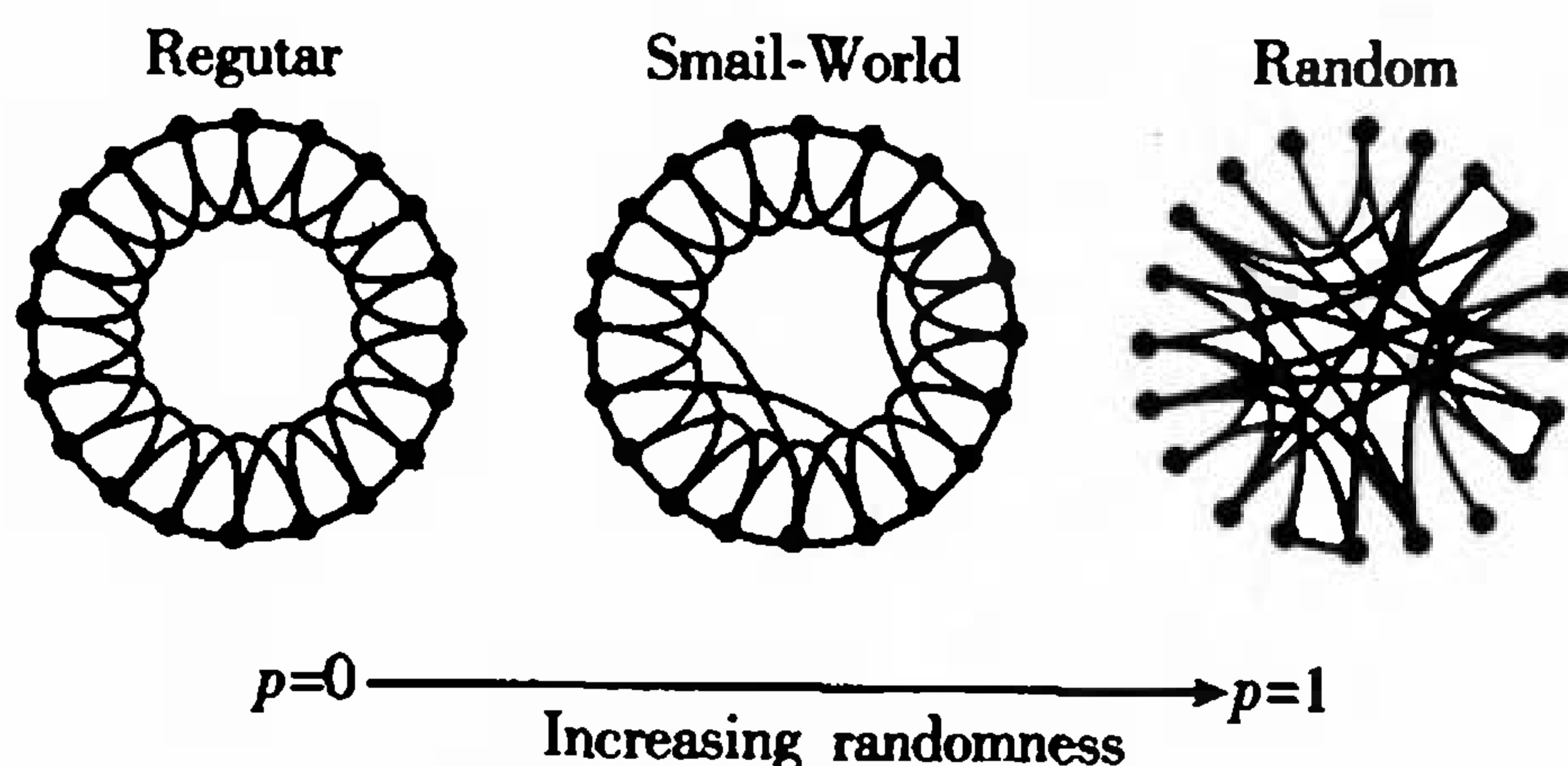


图 3—22 三类网络结构（从左至右）：规则网络、小世界网络、随机网络

二、无标度网络介绍

上文中我们已经提到，在过去 40 多年里，科学家习惯于将所有复杂网络看做是随机网络。随机网络的最大特点就是高度民主，绝大部分的节点拥有比较相似的连接数量。连接数量比平均水平高许多或低许多的节点，都是很少见的。

因此，当 A. Barabasi 和 R. Albert 等人于 1998 年研究互联网中网页的相互指向结构时，本以为会得出一个随机网络。因为他们觉得人们会根据自己的

兴趣，来决定将网络文件连结到哪些网站，而个人兴趣是多种多样的，可选的网页数量也极其庞大，因而最终的连结模式将呈现出相当随机的结果。

但是，最终的统计结果出乎预料。他们发现，万维网实际上是由少数高连结性的页面组织起来的，80%以上页面的连结数不到4个。然而只占节点总数不到万分之一的极少数节点，却有1000个以上的连结。这种网页的连结分布遵循所谓的“幂次定律”：任何一个节点拥有 k 条连结的概率，与 $1/k$ 成正比。它不像钟形曲线那样具有一个集中度很高的峰值，而是一条连续递减的曲线。如果取双对数坐标系来描述幂次定律，得到的就是一条直线。

无标度网络和随机网络的区别，可以从美国航空网和高速公路网的差异上看出。如图3—23所示，左边是以美国高速公路网为代表的随机网络，其中包含一些节点和随机的连结，大部分节点拥有的连结数目都差不多，节点连结数的分布情况如左下部分的钟形曲线所示。右边是以美国航空网为代表的无标度网络，这种网络内部存在着一些数量很少的集散节点，这些集散节点拥有的连结数量远高于其他节点，而大部分节点的连结数量则很少。无标度网络的节点连结数分布情况如右下部分的连续递减曲线所示，如果将连结数取对数以后，在双对数坐标系中，分布情况则是一条直线。

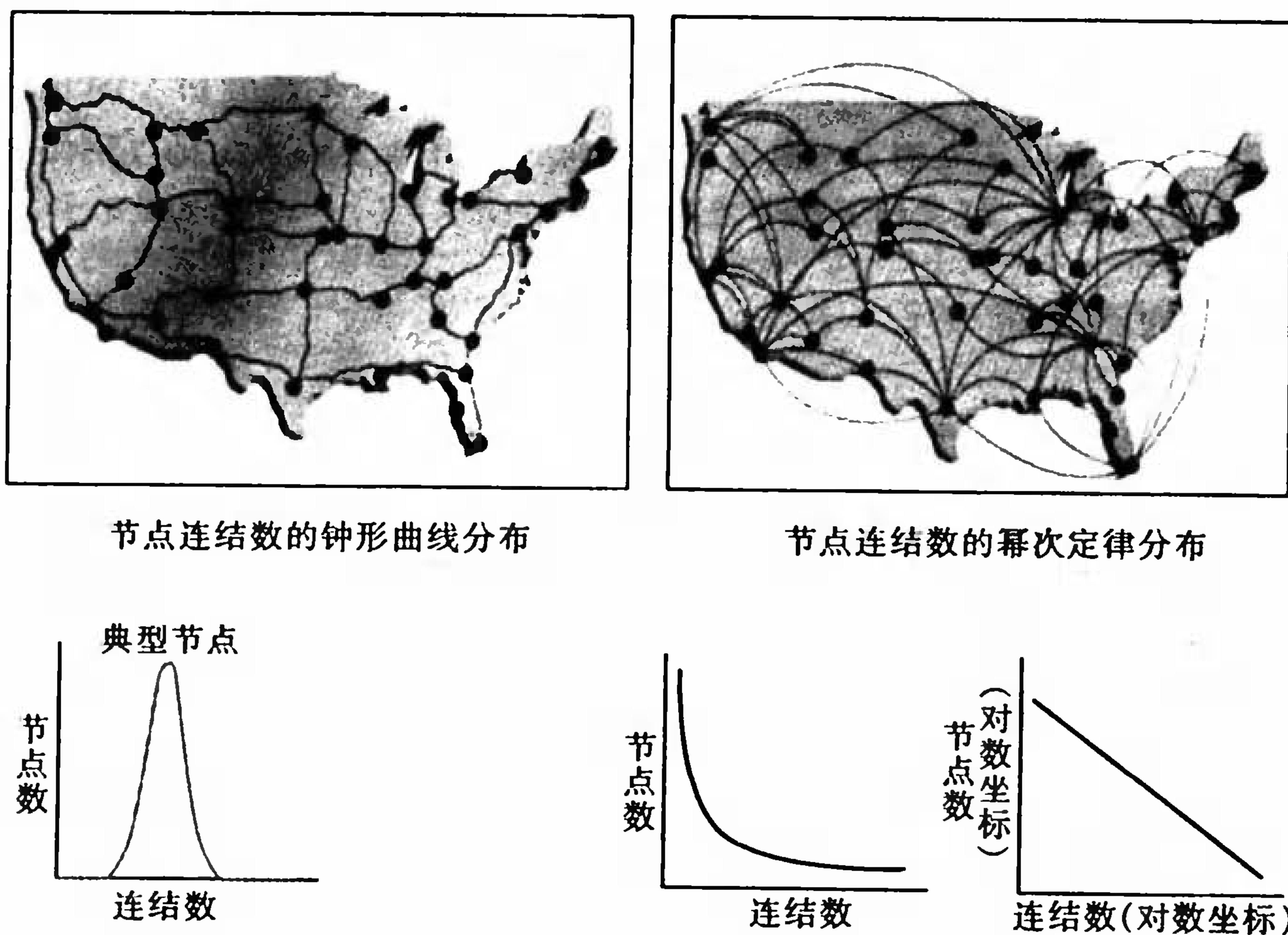


图 3—23 随机网络和无标度网络

在过去的几年中，研究者在很多系统中都发现了无标度网络结构。例如，在研究因特网的物理结构时，研究者研究了路由器的连结情况，他们发现，这个网络的拓扑结构也具有无标度性。美国波士顿大学和瑞典斯德哥尔摩大学的科学家们共同研究显示，瑞典民众的性关系网络也遵循幂次定律：尽管大部分人终其一生只有少数几个性伴侣，但有少数人（集散节点）的性伴侣多达数百人。波士顿大学的 Redner 则证实，由科学论文之间引用关系所连结的网络，同样也遵循幂次定律。美国密歇根大学安娜堡分校的 Newman 研究了包括物理和计算机等一些学科内科学家之间的合作关系网络，他发现这些网络同样也是无标度的。此外，好莱坞的演员关系网络、美国生物技术产业联盟网络，细胞中蛋白质的交互网络等等，都具有无标度性。

事实上，随着科学家们研究的网络越多，发现的无标度结构也越多。这些发现引发了一个重要的问题：为什么像细胞和因特网这些本质上不同的系统，却具有相同的结构并遵从相同的规律？这些不同的网络不仅都是无尺度的，而且还有着一个有趣的共同点——由于某些未知的原因，幂次定律中 k^n 项中的 n 值（ k 指连结数），通常介于 2~3 之间。

以上这些不同系统之间，在网络拓扑结构上的相似之处，以及无标度网络的形成原因，成为时下网络结构研究的热点。很多科学家从各种不同角度，对无标度网络进行了分析。其中，A. Barabasi 和 R. Albert 在分析了随机网络 ER 模型的基础上，建立的 BA 模型尤为精炼，很好地说明了无标度网络的成因。有兴趣的读者，可找相关参考资料阅读。

三、社会网络分析

（一）社会网络分析基础

社会网络是社会行为者（actor）及其相互关系的集合。一个社会网络是由多个点（行为者）和各点之间的连线（关系）组成的集合。用点和线来表示网络，即对社会网络的分析做形式化界定。我们为什么要建立社会网络关系模型？因为它可以描述群体关系的结构，研究这种结构对群体功能或者群体内部个体的影响（例如：通过观察国家地区之间的贸易、贷款、外资等交易关系，研究全球的经济体系状况及各个国家的经济特征）。它还可以研究群体变迁的历史性过程（例如：在若干个时间点测度国家与地区间的经济关系，从而利用社会网络的视角研究世界经济体系的变迁）。那么社会网络分析就是对社会关系进行量化分析，也就是说，行为者和他们的行动被视为相互依赖的而不是相

互独立的自治单位，行为者之间的相关链接是资源迁移或“流动”的通道。在许多社会科学和行为科学的学科中网络观点已经证明是富有成效的。比如，职业流动性（Breiger 1981c, 1990a）、城市化对个体安宁的冲击（Fischer 1982）、世界政治和经济系统（Snyder and Kick 1979; Nemeth and Smith 1985）、社会精英决策（Laumann, Marsden, and Galaskiewicz 1977; Laumann, and Pappi 1973）、社会支持（Gottlieb 1981; Lin, Woelfel, and Light 1986; Kadushin 1966; Wellman, Garrington, and Hall 1988; Wellman and Wortley 1990）等。下面我们来介绍社会网络分析中的一些基本概念。

1. 行为者 (actor)

任何一个社会单位或社会实体都可以看成是行为者，例如，行为者可以是个体、公司或者集体性的社会单位，也可以是一个教研室、系、学院、学校，更可以是一个村落、组织、社区、城市、国家等。

2. 关系

个人之间的评价关系：如喜欢、尊重；

物质资本的传递：货物流通、赠送礼物；

非物质资源的转换关系：如信息的交换；

协会或者隶属关系：参加一个协会，属于某个社会俱乐部；

交互作用：如同时参加一个聚会、拥抱、交谈；

运动：如迁入或迁出某个地点、改变工作或身份；

正式角色：如老板/雇员，演员/观众，老师/学生；

血缘关系：如遗传、亲属、继承。

3. 社会网络数据

结构变量：从成对的行为者（大小为 2 的行为者子集）中测量得来的，即测量两个行为者之间某种特定的联系，它们是社会网络数据集的基石。

组成变量：行为者的属性信息。

4. 模式：结构变量所测量实体来自不同集合的数量

结构变量从某个单一的行为者集合中测量得到，则产生的是单模式网络，包括两个行为者集合的网络数据集被称为双模式网络。例如，一个集合是由公司组成的，而另一个则是由非营利组织组成，接下来我们便可以测量公司给予非营利组织的财政支持。同样，包括三个行为者集合的网络数据集被称为三模式网络，包括四个行为者集合的网络数据集被称为四模式网络……

5. 从属网络

特殊的双模式网络：第一个模式是行为者集合，第二个模式是行为者所隶

属的事件集（比如俱乐部或自愿者组织），因而在从属网络数据中两组节点是行为者和事件。例如，我们来考虑在某个城市里有一组行为者和三个精英俱乐部，对于每一个俱乐部我们都可以定义一个从属变量，每一个从属变量都给我们提供了一个行为者的集合——即属于该俱乐部的那些行为者。

6. 点的度数

与某点相邻的那些点称为该点的“邻点”，一个点 n_i 的邻点的个数称为该点“度数”，记作 $d(n_i)$ 。一个点的度数就是对其“邻点”多少的测量，如果一个点的度数为 0，则称之为孤立点，每个图中的每条线都连着两个点，所以点的“度数和”是线数的 2 倍。

7. 点度平均值

一个图中所有点的度数的平均值，其表达式为：

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^g d(n_i)}{g} = \frac{2L}{g}$$

其中， g 表示图中点的个数， L 表示图中的边数。

8. 线路、迹、途径、闭路、环

线路：如果存在一个满足如下条件的由多个点和线构成的序列，即这个序列开始于一点并且终止于另一点，每个点都连结着一条线，线又接着下一个点，这一点线的序列就叫做“线路”（walk），记为 W ；**迹：**在一个线路中如果没有重复出现的线，这样的线路叫做迹（trails）；**途径：**如果一个线路中的各条线和各点都没有重复，这样的线路叫做途径（paths）；**闭路：**一个开始于并且结束于同一个点的线路叫做闭路（closed walk）；**环：**如果一个闭路至少包含三个点，除了起始点和终点是同一个点，其余的点都各不相同，并且各条线也不重复，这样的闭路叫做环（cycle）。

9. 途径的长度、测地线、距离、直径

途径的长度：构成该途径的线的条数；**测地线：**在给定的两点之间可能存在长短不一的多条途径，两点之间的长度最短的途径叫做测地线。**距离：**两点之间的测地线的长度叫做测地线距离，简称距离；**直径：**一个图一般有多条测地线，其长度也不一样，我们把图中最长测地线的长度叫做图的直径。

10. 密度

一个图中各个点之间联络的紧密程度，密度用图中实际拥有的连线数 l 与最多可能存在的连线数之比来表示。有向图为： $\frac{2l}{n(n-1)}$ ；无向图为：

$\frac{l}{n(n-1)}$ ；赋值图要复杂一些，在这个问题上学者们没有达成共识。

(二) 中心性——权力的量化分析

“权力”是社会学中的一个重要概念。一个人之所以拥有权力，是因为他与他人存在关系，可以控制、影响他人。社会网络分析工作者从“关系”的角度出发定量地界定权力，并且给出了多种关于社会权力的具体的形式化定义，即各种中心度和中心势指数。中心性是社会网络分析中的重点之一，行为者越处于中心位置，其影响力越大。中心度是指点的中心性，而中心势则是指一个作为整体的图的中心性。它又包括：点度中心性、中间中心性、接近中心性、权力指数。

1. 点度中心性

绝对点度中心度：某点的绝对点度中心度是指该点在图中的度数，即与该点直接相连的其他点的个数。

相对点度中心度：点的绝对中心度（实际度数）与图中点的可能的最大度数之比（在一个 n 点无向图中，任何一点的最大可能度数一定是 $n-1$ ，而在一个 n 点有向图中，任何一点的最大可能度数一定是 $2n-2$ ）。

图的点度中心势：首先找到图中的最大中心度数值；然后计算该值与任何其他点的中心度的差，得到多个“差值”；再计算这些“差值”的总和；最后用这个总和除以各个差值总和的最大可能值。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)}{\max \left[\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i) \right]} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)}{n^2 - 3n + 2}$$

2. 中间中心性

绝对中间中心度：一个点对 X 和 Z 之间可能存在多个测地线，假设为 n 个，一个点 Y 相对于点 X 和点 Z 的中间度指的是该点处于此点对的测地线上的能力，即经过点 Y 并且连结这两点的测地线占这两点之间的测地线总数之比。将点 Y 相应于图中所有的点对的中间度加在一起，便是点 Y 的绝对中间中心度。

相对中间中心度：点的绝对中间中心度与图中点的可能的最大中间中心度之比（只有在星型网络的情况下，图中点的中间中心度才可能达到最大值）。

$$\text{图的中间中心势} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)}{\max \left[\sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i) \right]} = \frac{2 \sum_{i=1}^n (C_{\max} - C_i)}{n^3 - 4n^2 + 5n - 2}$$

例如：图 3—24 中行为者 4 的绝对中间中心度：1 和 2:0；2 和 3:0；1 和 3:0.5；2 和 5:1；1 和 5:1；3 和 5:1；所以 4 的绝对中间中心度为：3.5。

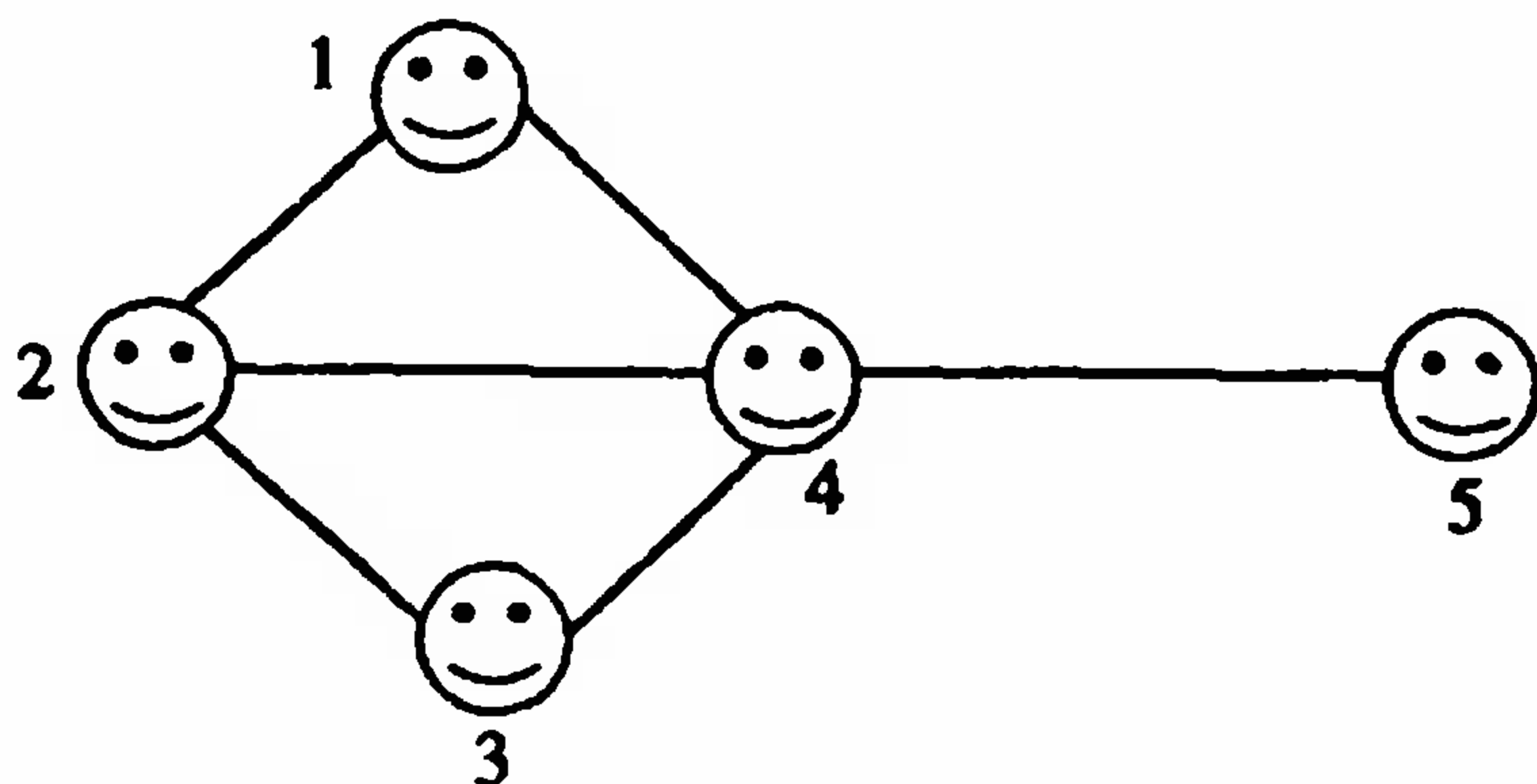


图 3—24

3. 接近中心性

绝对接近中心度：某点的绝对接近中心度是指该点与图中所有其他点的测地线距离之和。

相对接近中心度：该点的绝对接近中心度除以图中可能的与各点的测地线距离之和最小的点的绝对接近中心度（即除以 $n-1$ ），通常再取倒数。

图的接近中心势：

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n (C'_{RC_{\max}} - C'_{RC_i})}{(n-2)(n-1)} (2n-3)$$

4. 权力指数

波纳西茨注意到，对某点的中心度的测量不能脱离所有其他与之相关的点的中心度，如果一个点与各个中心点相连，该点的中心度也会提高，相应地，它也提高了与自己相连的其他点的中心度。

因此，在计算中心度的时候包含着内在的循环，各点的中心度之间是相关联的。进一步说，在确定一个点的中心度的时候，我们需要事先假定知道与之相连的所有其他点的度数，而且其他点的度数又依赖于该点的度数，这就是一种循环。为了解决这个问题，波纳西茨提出点 i 的中心度要根据如下公式测量：

$$c_i = \sum_j r_{ij} c_j$$

进一步推广后可以得到权力指数： $c_i = \sum_j r_{ij} (\alpha + \beta c_j)$

(三) 凝聚子群——社会结构的量化分析

社会学研究的一个重要任务是揭示社会的结构，对社会结构的研究存在两种思路：质化的结构观和量化的结构观。社会网络分析学者对社会结构进行量化研究，认为社会结构是在社会行为者之间实存或潜在的关系模式。分析网络中存在多少派系，每个派系之间是什么关系，派系内部成员之间的关系具有怎样的特点，一个派系的成员和另一个派系的成员之间的关系又具有怎样的特点等，这些便是对社会结构的定量研究。凝聚子群是满足如下条件的一个行为者子集，即在此集合中的行为者之间具有相对较强的、直接的、紧密的、经常的或者积极的关系。

1. 建立在互惠性基础上的凝聚子群（派系）

在一个图中，“派系”指的是至少包含三个点的最大完备子图。派系的成员至少包含三个点；派系是“完备”的，即其中任何两点之间都是直接相关，都是邻接的，并且不存在任何与派系中所有点都有关联的其他点；派系是最大的，其含义是，我们不能向其中加入新的点，否则将改变“完备”这个性质。

例：图 3—25 中派系包括： $\{1, 2, 3\}$ ， $\{1, 3, 5\}$ ， $\{3, 4, 5, 6\}$ 。

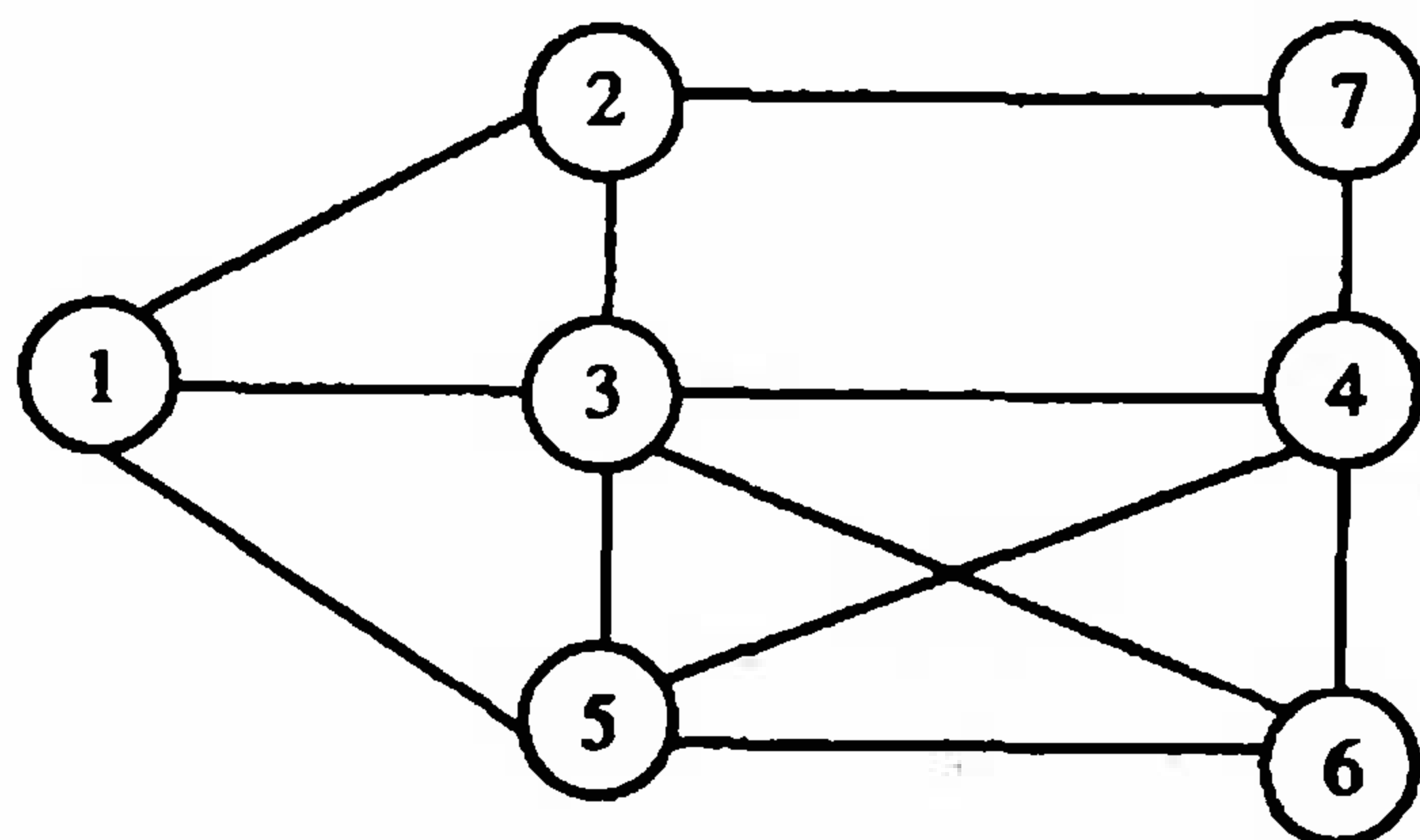


图 3—25

2. 建立在可达性和直径基础上的凝聚子群

n -派系：对于一个总图来说，如果其中的一个子图满足如下条件，就称之为 n -派系。条件是：在该子图中，任何两点之间在总图中的距离（即测地线距离）最大不超过 n 。

注意：作为一个子图， n -派系的直径有可能大于 n 。

N -宗派： N -宗派是指满足如下条件的一个 n -派系，即其中任何两点的测地线的距离都不超过 n 。所以作为一个子图， n -宗派的直径不会大于 n 。

例：图 3—26 中，有

2-派系： $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ 和 $\{2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

2—宗派： $\{2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

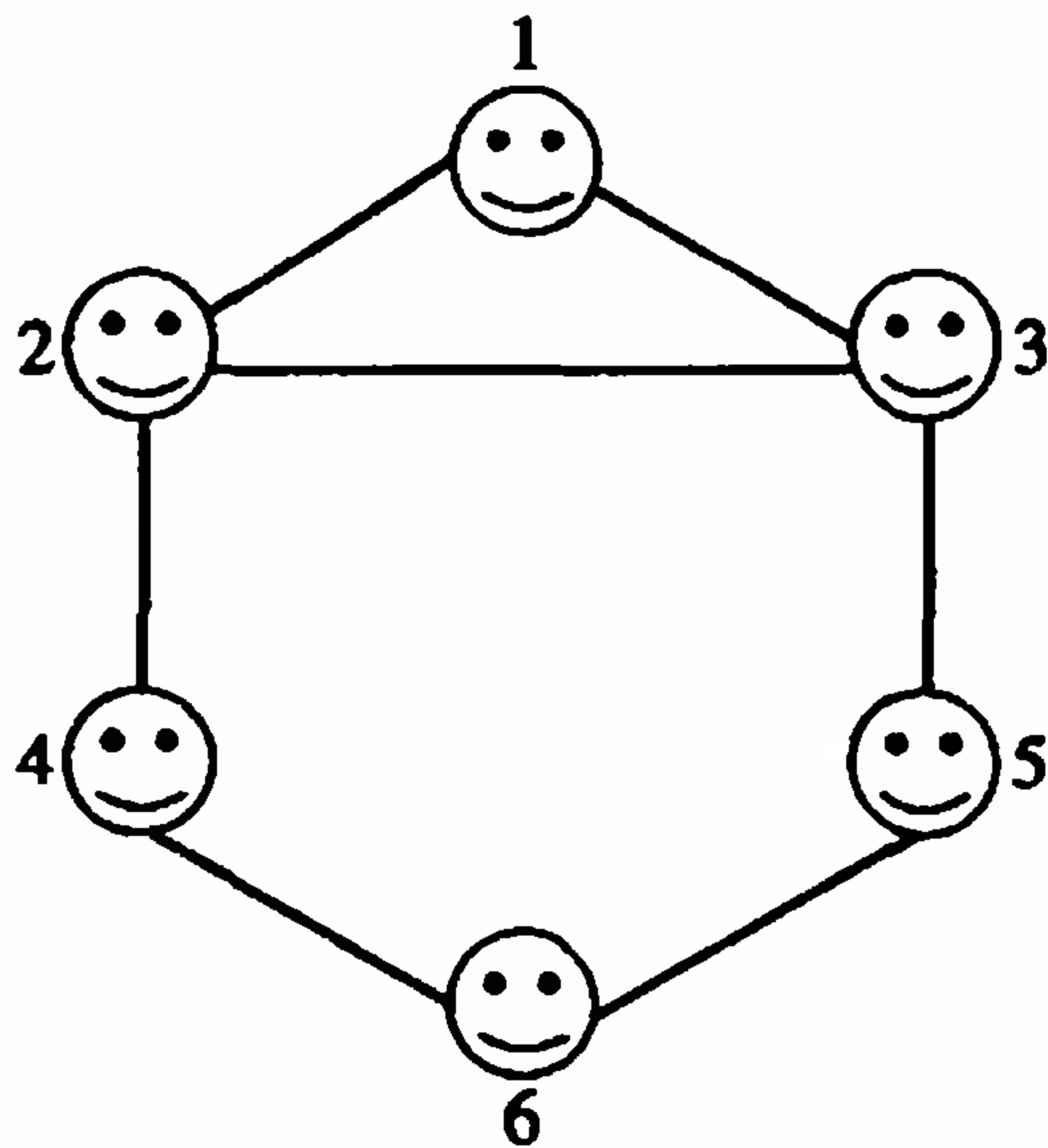


图 3—26

3. 建立在点度数基础上的凝聚子群

k —丛：一个 k —丛就是满足下列条件的一个凝聚子群，即在这样一个子群中，每个点都至少与除了 k 个点之外的其他点直接相连（邻接）；如果一个凝聚子群的规模为 n ，那么只有当该子群中的任何点的度数都不小于 $n-k$ 这个值的时候，我们才称之为 k —丛。1—丛即是一个派系；

k —核： k —核指的是满足下面条件的一个子图，即子图中的点都至少与该子图中的 k 个其他点邻接。

4. 根据子群内外关系建立起来的凝聚子群

成分：如果一个图可以分为几个部分，每个部分内部成员之间存在关联，但是，各个部分之间没有任何关联，我们就把这些部分称为成分（component）；

块和切点：在一个图中，如果拿走其中的某点，那么整个图的结构就分为两个互不关联的子图（成分），我们就称该点为切点（cutpoint），各个子图叫做“块”（blocks）；

Lambda 集合：一对点 i 和 j 的“边关联度”指数 $r(i, j)$ 等于为了使得这两个点之间不存在任何路径，必须从图中去掉的线的最小数目。如果下面的条件满足，我们就说 N_s 是一个 Lambda 集： N_s 自身内部的任何一对点的边关联度都比任何一个由来自于 N_s 的一个点和 N_s 外部一点构成的点对的边关联度要大。从形式化的角度来说，一个 Lambda 集是一个满足如下条件的点集对于所有的 $i, j, k \in N_s$ ，并且 $1 \in N - N_s$ 来说，都有： $r(i, j) > r(k, 1)$ 。

（五）对等性——社会角色的量化分析

在社会网络分析中，社会角色指的是“网络角色”，网络分析者在谈论角

色时更多地是为了把握行为者之间的关系模式的相似性，而不是行为者的个人属性及其类别和个体变量。如果两个行为者与所有其他行为者之间的关系模式相同，我们就说这两个行为者具有相同的社会角色。“角色研究”与“凝聚子群”研究是不同的，前者的目的是把相似的行为者分到同一个派别中，每一派内部的行为者是相互对等的，因为他们拥有类似的结构特征；各个派别的行为者之间则不是对等的。“凝聚子群”研究主要是为了找到整体网络中的一些子网络和子群体。总之，在社会网络研究中，“相似性”至少有三种不同的类型：结构对等性、自同构对等性、规则对等性。

1. 结构对等性

如果两点与所有其他点之间的关系都相同，我们就说这两个点是完全结构对等的。对于有向关系网络来说，如果下述三个命题对于行为者 i 和 j 来说都成立，我们就说行为者 i 和 j 在结构上对等： i 和 j 与其他行为者之间的关系完全相同； i 与 j 的关系也反映在 j 与 i 的关系之中；两个行为者分别与自身的关系模式相同。

2. 自同构对等性

在结构对等性中，两个行为者可以相互替换位置而不影响网络。如果调换两个行为者之后，并且其他行为者也变动的情况下，仍然不改变网络的性质，或者说对于图中所有点之间的距离没有任何影响，我们就说这样的两个点是自同构对等的点。从形式化角度上讲，对于一个标签图 G 中的两个点 u 和 v 来说，如果满足如下条件，就称这两点具有自同构对等性：在互换点 u 和 v 之后，所有点也能在被重新赋予标签之后形成一个同构图。具有自同构对等的点集叫做环 (orbit)。

例：图 3—27 中具有 5 个环 (1), (2, 3), (4), (5, 6, 7, 8), (9, 10, 11)。

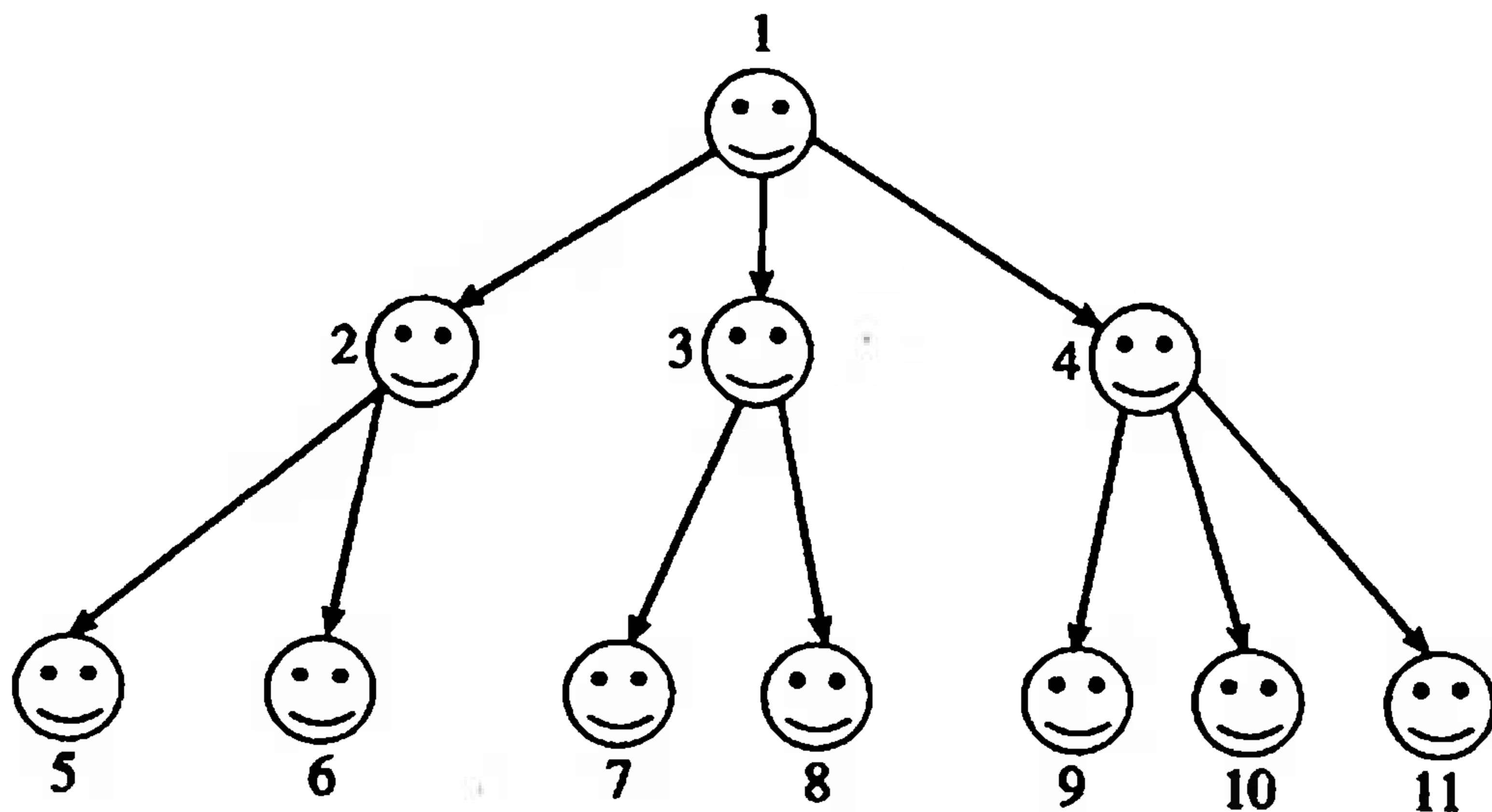


图 3—27

3. 规则对等性

具有规则对等性的点集所描述的社会角色或者社会类型是建构所有社会结构的基础, 具有规则对等的各个行为者与其他集合的某些行为者之间具有相似的关系。占据相同位置的行为者与另外一些占据其他相同位置的行为者之间的关系往往是对等的。规则对等性并不要求一些行为者与等同的其他行为者有相同的关系 (这是结构对等性所要求的), 也不要求上述两类行为者在结构上不可区分 (这是自同构对等性所要求的), 而要求一类行为者与另外一类行为者之间具有相似的关系。如果行为者 i 和 j 是规则对等的, 并且行为者 i 具有到/来自某个行为者 k 的关系, 则行为者 j 必须具有到/来自某个行为者 l 的同样类型的关系, 并且行为者 k 和 l 必须是规则对等的。从形式上说, 如果行为者 i 和 j 是规则对等的, 即 $i \equiv j$, 则对所有的关系 $X_r, r=1, 2, \dots, R$, 及对所有的行为者 $k=1, 2, \dots, g$, 如果 $i \rightarrow k$, 则存在某个行为者 1 , 以致 $j \rightarrow 1$ 并且 $k \equiv 1$, 以及如果 $k \rightarrow i$, 则存在某个行为者 1 , 以致 $1 \rightarrow j$ 并且 $k \equiv 1$ 。

(六) 核心 vs 边缘——位置的量化分析

伊曼纽尔·沃勒斯坦 (Immanuel Wallerstein) 在其著作《现代世界体系》中指出: 现代世界体系是一个经济体系, 资本主义是其基本内核, 其结构特征是: 中心——半边缘——边缘。

世界范围内的劳动分工将世界划分为三个地带, 即中心地区 (20 多个发达资本主义国家)、半边缘地区、边缘地区 (多数发展中国家) 三个部分。社会网络分析者从模型的角度研究核心——边缘结构, 这就使核心、边缘等有了明确的操作化标准。利用某种核心——边缘模型, 并结合现实数据, 可以判断行为者所处的位置, 或者估计出行为者的“核心度” (coreness), 从而对行为者处于什么位置有一个量化的认识。

第九节 复杂系统鲁棒性研究

一、题解

近年来, 学术界对于鲁棒性的研究明显增加。来自不同学科的许多学者, 不约而同地使用鲁棒性这个术语。这表明作为复杂系统的一种值得注意的属

性，鲁棒性已经成为人们关注的一个热点议题。什么叫做鲁棒性呢？其实这个名字是一个音译，其英文拼写为 robustness，鲁棒性是暂译名，在一些文献中，它也被翻译成健壮性和强壮性。

在不确定性和危机出现的情况下，鲁棒性已经成为系统能否生存下去的关键。例如，在生态系统遇到了或大或小的扰动时；在细胞遇到了环境变化或者发生遗传变异的时候；计算机软件在遇到了输入错误、磁盘故障、网络超载或蓄意攻击的时候；一款科技产品在富于变化的市场中其生存能力也经常受到挑战；在行政机构面临社会急剧变迁的时候——在所有这些情况中，鲁棒性将是决定性的因素，而不是其最优化、可扩展性或稳定性等其他属性。

二、定义

“鲁棒性”这个术语在多年前就被提出来了，但是对于它的精确定义至今还没有一致的说法。目前存在的定义有许多，可以按生物、生态、物理、工程、社会学、自然界等分类。在不同的语境下，鲁棒性具有许多不同的含义。

试图建立一个关于鲁棒性的统一的概念是不现实的。目前大家想要得到的是一个能够区分细微差别的共同术语，研究者能够有所区分地说出“A 的鲁棒性”（以区别于 B 的鲁棒性或 C 的鲁棒性），而其他的研究者也同意这样使用这个术语。所以与其试着去统一这些定义，还不如试试把它们收集到一起。同时，对定义的讨论将使人们对经常与“鲁棒性”交替使用的那些术语（包括“稳定性”、“恢复性”、“可靠性”、“持久性”、“存活性”、“容错性”、“可塑性”等等）之间的相似和差异得到更好的理解。

根据圣菲研究所的收集，目前，研究人员提出的不同定义达 17 个之多。他们的目标很明确，不是为了达到用法的一致，也不是约束不同领域的研究者对这个术语的使用，而是为了探究鲁棒性含义的范围，并希望能够改进。下面就列举其中的几个（括号内注明该定义所属的类别）：

鲁棒性是一个系统即使面临着内部结构或外部环境的改变时，也能够维持其功能的能力。（网络、生态）

鲁棒性是一个系统或组件在出现不正确的或矛盾的输入时能够正确运行的程度。（计算机系统）

语言的鲁棒性（识别和分解等等）是指人类即使在信息不完全、意思模糊或不断的变化的情况下，仍然能够实现沟通的能力。（人类语言技术）

鲁棒性是一个系统在遇到了设计中所没有考虑过的情况时不受到影响的程度。（实用非线性控制）

鲁棒性是那些具有恢复、自我修复、自控制、自组装、自我复制能力的系统所具有的特性。(生物系统)

如果一个模型在某种假设下是正确的,而这个假设不同于设计该模型时所用的假设,那么这个模型就具有鲁棒性。(模型的不可靠性和鲁棒性)

鲁棒性是软件在非正常环境下(也就是在规范外的环境下,包括新的平台、网络超载、内存故障等等)做出适当反应的能力。(面向对象的软件构造)

从以上的简单列举,就已经可以看到鲁棒性这个概念的丰富内涵。

三、意义和价值

为什么要提出“鲁棒性”这个概念呢?有必要提出这个新概念吗?它存在的价值是什么?在下面的论述中就把鲁棒性作为一个新的概念,从鲁棒性与脆弱性的关系、鲁棒性与稳定性的区别、鲁棒性超越稳定性这三个方面来介绍学术界的看法。

(一) 鲁棒性和脆弱性

许多文章通过具体的实例来看鲁棒性与脆弱性的关系。例如,生物有机体在遇到环境和组成部分的不确定性时是高度鲁棒性的,然而遇到了基因上的微小的扰动或者显微镜下可见的病原体出现时,生物有机体可能就劫数难逃了。777 飞机在遇到了大规模的大气扰动、货物负载和燃料的改变、材料老化时是鲁棒的,但是当遇到了超大规模集成电路芯片的显微镜下可见的少量改变时或者遇到软件故障时,可能就会劫数难逃。而这种情况在一个简单的交通工具上就完全不会出现。可以看出这种复杂性可以将小扰动的影响放大,所以设计工程师必须保证这种扰动要非常少。

一般地说,鲁棒性与脆弱性是并存的,在某一方面具有鲁棒性的事物在另一方面则可能同时具有脆弱性,或者在某一层次上具有鲁棒性而在另一层次上则具有脆弱性。这方面最典型的的就是互联网。

(二) 鲁棒性与稳定性的区别

鲁棒性和稳定性有什么不同呢?一些学者认为这两个概念都是用来定义一个给定系统在遇到了特定的扰动时所显现出来的特征。大体上说前者是刻画系统中过程相对初始条件变化的保持能力,而后者是过程相对环境或系统本身变化的保持能力。

对于有些系统,扰动不是外部输入或内部系统参数上的波动,而是指系统组成、系统拓扑结构或系统运行环境根本假设的变化,此时鲁棒性能够测

度这类系统特征的持续性。鲁棒性典型地应用于“复杂适应系统”当中，正如J·霍兰所说，“我们通常不担心石头的鲁棒性。”在稳定性理论中假设单一的扰动是很典型的；而从鲁棒性的观点来看，经常需要从多重角度来考虑多重扰动。

当今在系统和控制领域中，有很多关于鲁棒稳定性或稳定鲁棒性的讨论，说明这两个概念的研究是应该并且是有条件放在一起进行的，这两个重要基本概念实际上已经紧密相连。但要注意，在还没有指定对一个系统感兴趣的特征和扰动的时候，谈论这个系统是稳定的还是鲁棒的是没有意义的。表3—3给出了几个实例，对于其中的一些扰动来说，稳定性理论是完全适合的，而另一些扰动则需要不同于稳定性概念，即鲁棒性。

表 3—3 几个例子

系统	感兴趣的特征	稳定性理论可以解释的扰动	需要鲁棒性概念来解释的扰动
笔记本电脑	软件性能	错误输入的数据	磁盘划伤
免疫系统	抗体响应	自体免疫紊乱	新的病毒
U. S. 行政系统	合理性	人口统计学的改变	经济衰退

(三) 鲁棒性的主要特点

有人认为鲁棒性是作为稳定性的高级形式出现的，实际上鲁棒性与稳定性是根本不同的。在鲁棒性的研究中出现了许多与稳定性的基本框架相抵触的情况，应该说，鲁棒性超越了稳定性。鲁棒性是反映系统持久性的方法，它所面临的扰动与设计系统时所考虑到的不同或者与先前所遇到过的那些不同。

1. 鲁棒性与层次

对于系统鲁棒性的讨论只有当清楚地确定了系统的层次时才会有意义。一个层次上的鲁棒性不需要意味着其他任何层次上的鲁棒性；相反地，一个层次上的鲁棒性可能通过偶然发现的过程或其他方式赠与另一个层次上的鲁棒性。例如，在生态系统中，在某一扰动下的个体要素物种可能是鲁棒的，并且通过这样的方式相互作用引起类似的鲁棒集合。此外，即使物种本身是鲁棒的，而生态系统作为一个整体却可能不是鲁棒的。还有一种相反的情况是，自身并不鲁棒的物种能够相互影响以至于造成了一个鲁棒的集合体。也就是说，鲁棒性在一个层次上是否存在并不意味着在另一个层次上是否也存在。

2. 鲁棒性与演化的关系

鲁棒性和演化性之间存在着折中。不严格地说，鲁棒性可以被看做是对于外部和内部扰动的不敏感性，而演化则需要实体改变它们的结构或功能来适应

变化的环境。鲁棒性和历史持久性之间的关系类似于贯穿了进化历史的守恒与基因的适应性之间的关系。比如说，哺乳动物的感官处理系统在进化过程中在某种意义上是最具有鲁棒性的。味觉感官系统在破坏了味蕾之后能够使自己再生，并且嗅觉系统在损失了化学感应器后能够同样地恢复。然而，味觉系统在进化过程中比嗅觉系统居先，能够在损失了削弱的神经后再生，而嗅觉系统则不能。

3. 花费和收益

作为一个普遍规律，在那些要求对于某些攻击具有高容忍性并必然对另一些攻击具有低容忍性的鲁棒的系统当中，存在着严格的守恒定律。例如，一个航行器或者是高度易操作的，或者是非常能够抵抗住高射炮射击，但是可能不是两者兼有的。所以，在必要的时候应当做好花费和收益之间权衡。

4. 设计原理

如果作为一种设计原理来理解鲁棒性，那么问题就是那些不能预先遇到的和在现实中不能预见的攻击的性质、响应和集合。对于存在着无数潜在攻击的系统，什么设计原理可以指导系统的结构？此时使用联合概率分布来估计未来和结果是相当悲观的。目前的一个看法是，具有这种性质的鲁棒性，如果存在，会与大脑在发展和学习一个完美的鲁棒性系统的过程中的更高水平的认知过程有些相似。做出的推测是，开放的鲁棒性会依赖多维系统的性能，例如感应和推理、创新的涌现和对问题创造性的解决。

四、目前鲁棒性研究的方向

鲁棒性的研究方向有：生态系统的恢复性、生态系统的结构、动态平衡和生存、细胞进程的随机性、遗传网络、遗传变异的阻尼、生物复杂性的发展、定向进化、进化的自动选择、免疫系统里的分布式反馈、神经系统、神经和发动机系统之间的交互作用、模型驱动系统、大脑中的信息处理、网络系统、计算系统、计算机安全、人类与环境的交互作用、“脆弱性”和社会—自然现象的综合研究、社会—文化传统、社会制度、经济、经济学博弈、多样性、决策、宪法、政治协议、政府和政体、所有权的转移、古文明的轨迹，等等。

把鲁棒性作为一个自然界、工程学和社会学系统的设计原理来研究时，只有当它在一些环境下的使用能够达到用其他方式所不能达到的作用时，才会有实际意义。

五、鲁棒性的应用

在真实系统的设计和分析中，人们已经对于鲁棒性的概念和方法论进行了

许多应用。鲁棒性在其发展的这些年里，在各学科领域里都积攒了一些应用的实例，包括生物、生态、物理、工程、社会学、自然界等各领域。下面举一个使用电子实验室的具体例子。

当面对混沌的变化时，鲁棒的系统经常表现出适应性的一致。建造鲁棒的系统需要同时具备对鲁棒性的理解和由经验得出的工具，来确保对鲁棒性的理解被正确地应用。对于一些应用来说，可以使用基于主体的模型和模拟 (ABMS)。适当的时候，ABMS 可以被用作电子实验室 (e-laboratories)，这样就可以在问题被实践或实际开发之前来测试系统的鲁棒性。下面来看一个实例：

电价政策规定了发电方由对电网的输入所获得的报酬。目前的电力市场上使用多种定价政策。决定一个有效的电力定价政策是一项复杂的工作，它是市场的鲁棒性中一个重要的分支。ABMS 被用来研究市场行为和市场的鲁棒性，比如说能源系统、资产净值、外汇。特别是，Argonne 国家实验室已经建立一些电力市场 ABMS，包括电力市场的复杂适应性系统模型 (EMCAS)。

在 EMCAS 模型中，在电力市场中的不同参与者作为“主体”，他们每一个都具有自己的目标、决策规则和行为模式。与常规的电力系统模型不同，EMCAS 并不要求在整个系统中每一个单独的决策者具有一个单独的目标，而是每一个主体可以建立各自的目标并且使用各自的决策规则。模拟进行过程中，主体在他们先前行为的成功或失败的基础上来使他们的策略适应环境。EMCAS 担当一个电子实验室的功能，在真实世界中试验定价策略之前，通过在模型中指定不同的策略并进行实践来测试定价策略的鲁棒性。EMCAS 是一个基于 Java 的 ABMS，并且使用 RePast 软件。

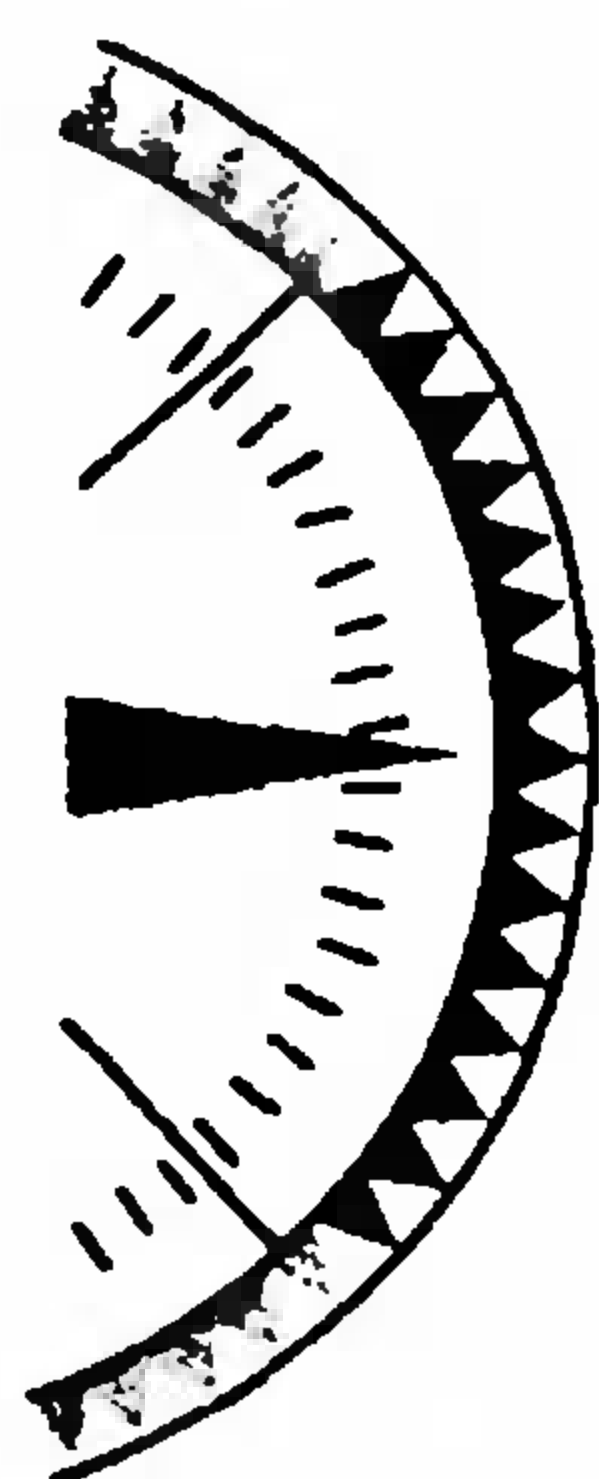
关键词

系统状态 演化 分形 分数维 迭代函数系统 Logistic 方程
分岔 元胞自动机 人工生命 简单巨系统 熵 CAS 理论 复杂
网络 无标度网络 社会网络分析 复杂系统鲁棒性

复习题

1. 什么是状态空间？奇异吸引子的主要特点是什么？
2. 什么是分形？分形的主要应用有哪些？
3. 什么是 IFS？它的基本原理是什么？

4. 什么是分岔现象？在 Logistic 方程中，当 a 取不同值时，系统的状态都将如何变化？
5. 简要介绍元胞自动机以及人工生命的基本概念。
6. 简单巨系统的特点有哪些？熵在简单巨系统中的应用是怎样的？
7. CAS 理论的基本思想是什么？
8. 无标度网络的基本特点有哪些？
9. 鲁棒性的定义是什么？它有什么研究的意义和价值？



第四章

计算机建模工具

内容提要

在复杂系统的研究中，计算机模拟发挥着重要的作用，但科学家不是软件工程师，写程序对他们来说是一项复杂的工作，Swarm 系统是一个高效率的、可信的、可重用的建模平台，大大简化了建模过程的程序开发工作。本章详细介绍了 Swarm 产生的背景、过程；Swarm 的建模思想和 Swarm 模型的结构；Swarm 的类库以及 Swarm 的安装与配置，希望读者也可以尝试用 Swarm 创建自己的模型。本章最后介绍了其他的基于主体的建模平台，并对他们进行了比较，供读者参考。

第一节 Swarm 建模平台

一、Swarm 的产生背景

在科学研究中，特别是在复杂系统的研究中，计算机模拟已经开始和科学仪器一同发挥重要的作用。计算机模拟实际上就是用软件制造的实验仪器，这种方法在某些方面已经取代了物理实验仪器。与传统的实验方法相比，计算机

模拟提供了很多好处，但同时也带来了诸多问题。例如，写软件就是一项复杂的工作，而且总是会遇到各种各样的错误。

早期的科学家通常自己制造实验仪器，自己磨透镜，自己连探测器，甚至自己制造计算机。研究者首先是工程师、技师、电工，其次才是科学家。随着一个研究领域变得成熟起来，科学家开始和工程师合作开发出标准的、可信的仪器（例如，我们可以买到的显微镜、温度计等）。这使得科学家可以将更多的精力用于研究而非制造工具。使用标准化科学仪器的好处还不仅于此，它允许人们用通用的各种仪器进行各种实验，从而得出可重复、可比较的研究成果。

在复杂性的研究过程中，人们经常需要依靠计算机。圣菲研究所的研究者花了很多时间来制造他们自己的软件实验仪器。不幸的是，建立计算机模型常常使优秀的科学家变成糟糕的程序员。许多科学家没有经过软件工程的训练，因此，不少自制的计算实验工具都设计得不好。通过使用这些工具得出的结果很难与其他人的研究数据相比较，其他人也很难对这些工具进行改造，因为程序中充满了编程者偶然的和未经详细考虑的想法。在这种情况下，相同功能的程序被不同的研究小组一次又一次地重建，造成了巨大的浪费。

一个专业的计算机模型的代码非常复杂，恐怕只有作者本人才能理解。典型的模拟软件包括大量不易发现的消耗，偶尔要写一些与实际模型毫无关系的代码。这样的软件对作者是有用的，但其他科学家要想对其评估或改造就太难了。为了使计算机建模成熟起来，我们需要一个工艺精良的、标准的软件工具集。Swarm 项目的目的就是通过科学家和软件工程师的合作而制造的工具。

二、Swarm 简介

从 1994 年开始，复杂系统研究的发起重镇——美国圣菲研究所（SFI）开展了一个研究项目，率先尝试开发一个帮助科学家们分析复杂适应系统的工具集，这个模拟工具集就叫做 Swarm。它实际上是一组用 Objective-C 语言写成的类库，这是一种面向对象的 C 语言。一部分图形界面，如图表、按钮和窗口是用 TCL/TK 描述的。1995 年，SFI 发布了 Swarm 的 beta 版（测试版）。Swarm 最初只能在 Unix 操作系统和 X Windows 界面下运行，1998 年 4 月，伴随着 Swarm 1.1 版的发布，Swarm 推出了可以在 Windows 95/98/NT 上运行的版本。1999 年，Swarm 2.0 版又提供了对 Java 的支持，从而使其越来越

有利于非计算机专业人士使用。Swarm 最为流行的版本是 2000 年发布的 2.1.1 版,最新版本是 2005 年年初发布的 2.2 版。

Swarm 系统是一个高效率的、可信的、可重用的软件实验仪器,为研究人员提供了一套标准、灵活、可靠的软件工具,用来对复杂适应系统进行研究。Swarm 的基本目标是将研究人员从构造大规模计算机模拟时产生的大量软件工程方面的负担中解脱出来。为达到这个目标,Swarm 提供了一整套工具和一个驱动模拟的内核。研究人员可以自由地定制 Swarm 中的多种对象,在感兴趣的领域内对系统建模。

用 Swarm 创建的世界,它们的特性可能极为不同,从二维平面世界到主体交换信息的通信网络的抽象图形。但不管什么样的世界,Swarm 都提供了一个通用的一致框架,使工作人员可以将精力集中在感兴趣的特定系统中,而不必被数据处理、用户界面及其他纯软件工程和编程等方面的问题所困扰。统一的模型框架,一方面能够减轻模型设计的技术负担,让建模者集中精力专攻自己的专业领域,而不必从最底层代码开始编写模型、把精力耗费在软件编写中;另一方面,统一的框架能够规范模型的设计,从而便于模型的理解和交流。

Swarm 平台常常被称为 Swarm 库。项目研究人员在 Linux 环境下用 Object-C 编写了这样一个为方便建立多主体模型的标准类库,使得其他研究者可以基于组件进行模拟,这些组件已经在不同环境中得到测试,而且为本领域其他研究者所了解,对于建模者来说,这个 Swarm 库提供的大量函数就是用户开发的接口,这些函数大大减轻了建立模型的编程负担。早期的 Swarm 版本只能应用 Object-C 进行模型程序的开发,因此建模设计者必须学习一些基本的 Object-C 的程序设计知识;自 2.1 版推出后,Swarm 增添了 Java 开发接口,因此用户可以采用更为流行的 java 作为建立模型的开发语言。目前,Swarm 类库提供了大量多主体模型设计中都需要考虑的共同要素,特别设计了那些非专业程序员难以胜任且繁琐的部分,包括图形输出的算法和用户界面的管理等。对于不同的研究领域来说,基本库是通用的,各个领域的研究者可以利用基本库构建适合于特定领域的专用库。用户可以使用 Swarm 提供的类库构建模拟系统,使系统中的主体和元素通过离散事件进行交互。由于 Swarm 没有对模型和模型要素之间的交互进行任何约束,Swarm 应当可以模拟任何物理系统或社会系统。

作为开放源码项目公开发布的 Swarm,在社会科学复杂性研究应用领域获得了巨大的成功。在世界范围内,在广泛的学科领域中,有许多科研机构高

等院校都在开展 Swarm 的应用研究或教学。在经济学、人类学、政治科学、生态学、考古学、甚至信息技术、化学、物理学等领域，都有应用 Swarm 的研究群体。

第二节 用 Swarm 建模

一、Swarm 的建模思想

Swarm 的建模思想是一系列独立的个体通过独立事件进行交互。在这种框架下，使用 Swarm 不必在特定模型的实现上花费过多精力。Swarm 模拟可以在诸多方面发挥作用，而无需限定一个特定的领域。例如，特定的空间环境、物理现象、个体表现或交互模式。

Swarm 模拟的基本单位是个体，一个个体就像系统中的一个演员，是能够产生动作并影响自身和其他个体的一个实体。模拟包括几组交互的个体。例如，一个生态系统的模拟可能包括狼、兔子和胡萝卜；在一个经济学模拟中，个体可能是公司、证券代理人、分红利者和中央银行。个体之间独立的交互行为的模拟与连续系统模拟不同。在连续系统模拟中，模拟现象是一组有关联的等式之间的量的关系。

个体定义 Swarm 系统中的基本对象——模拟部件。一个时间表定义这些对象的独立事件发生的流程。在 Swarm 中，特定的行为发生在特定的时间，行为的发展按照时间表的规定进行。时间表是一个数据结构，其中包括各事件的执行顺序。例如，在狼/兔子这个模拟系统中可能有三种行为：“兔子吃胡萝卜”，“兔子躲避狼的追踪”和“狼吃兔子”。每种行为是一个独立的动作。在时间表中，对这三种行为按照以下顺序排序：“每天，兔子先吃胡萝卜，然后它们躲避狼的追踪，最后狼试图吃兔子”。模型按照这种安排好的事件的执行顺序向前发展。

Swarm 中的基本组成部分或对象被称为 Swarm 的对象集合。这是一组智能体，它带有一个明确定义的、必须处理的事件调度表。一个 Swarm 可以表示整个模型：它有智能体和时间。而且，Swarm 中的每一个对象都可以由 Swarm 组成。“单细胞动物占据一个池塘，每一个动物都是器官的集合”。更进一步，从一个经济学家的观点来看，一个智能体可以有它自己的、属于现实世界的表现。因此，一个在某些环境中生存的智能体可以有它自己现实中的

model-Swarm, 由于 Swarm 是根据自然科学家所构思的需要设计的, 实时和并发的观点非常重要。自然界中, 一致性受到物理定律的制约。但是当人们使用计算机后, 仿真行为不得不在预先定义好的时间顺序下运行。设计 Swarm 的目的, 是使实验者弄清楚他关于事件顺序的假设是否成立 (现实世界中的实验是由自然界自动协调的)。这一点对于经济学是非常有意义的: 通过迫使研究者弄清楚时间和有序事件序列之间的关系, 引入“真实的”动态, 智能体间交互或反馈机制的作用都将花费一定时间, 并且一个事件只有在指定的事件已经发生后才发生。由于每个 Swarm 都可以观察到它自己的调度表, 所以很容易将一个时钟异步管理引入系统。这也反映了现实世界现象的一个基本特性。这一特性是由独立成员的交互作用造成的, 其中每一个作用者都遵循它自己的目标和调度表。当然, 这种选择基于时钟工作的动态方法, 许多传统的经济模型也曾使用。

Swarm 非常强调内部过程的可观察性, 这个特性归因于平台设计者的自然科学背景。因为如果一个实验中没有人在那里观察, 那么实验中所发生的事情都是未知的; 因此, 在 Swarm 模型中, 必须设计一个观察者。

在涉及自然过程时, Swarm 试图复制事情自动发生的时序过程, 模型程序建立的是在人工观察者观察下的人工世界。这两类对象 (观察者对象和被观察的人工世界) 都会按照各自明确而独立的调度表来演化。决定观察什么和什么时候观察是由观察者决定的。如果观察者希望对另外一些现象特征进行观察, 可以立即重新放置一些“显微镜”或“摄影机”到人工世界中侦察。在实际模型研究中, 可能需要改变人工观察者的一些细节, 但不会影响被观察的对象, 它们总是独立的在人工世界中或生存或忙碌。

前面提到, Swarm 的建模思想可以概括为“一系列独立的个体通过独立的事件进行交互”。与传统的建模方法不同的是, Swarm 是一种支持“自下而上” (bottom-up) 或者称“基于过程” (process-based) 的建模工具。实现模型时, 一个“Swarm”简单地代表一个主体的集合以及它们的行为时序表 (Schedule)。Swarm 还允许嵌套, 因此可以直接表示多层的模拟结构。Swarm 的核心实现机制是使用一种面向对象 (OO) 的表达方式, 建立多主体的独立事件模拟, 研究这些由多主体所组成的网络的各种行为。这里所说的多主体可以是同质的, 也可以是异质的, 比如一组计算机处理器中的成员, 一组算法中的元素, 人类免疫系统中的细胞, 调节网络的基因, 生态系统中的个体种类, 经济系统中的消费者, 等等。用户可以使用 Swarm 提供的类库构建模拟系统, 使系统中的主体和元素通过离散事件进行交互。Swarm 的嵌套结

构如图 4—1 所示。

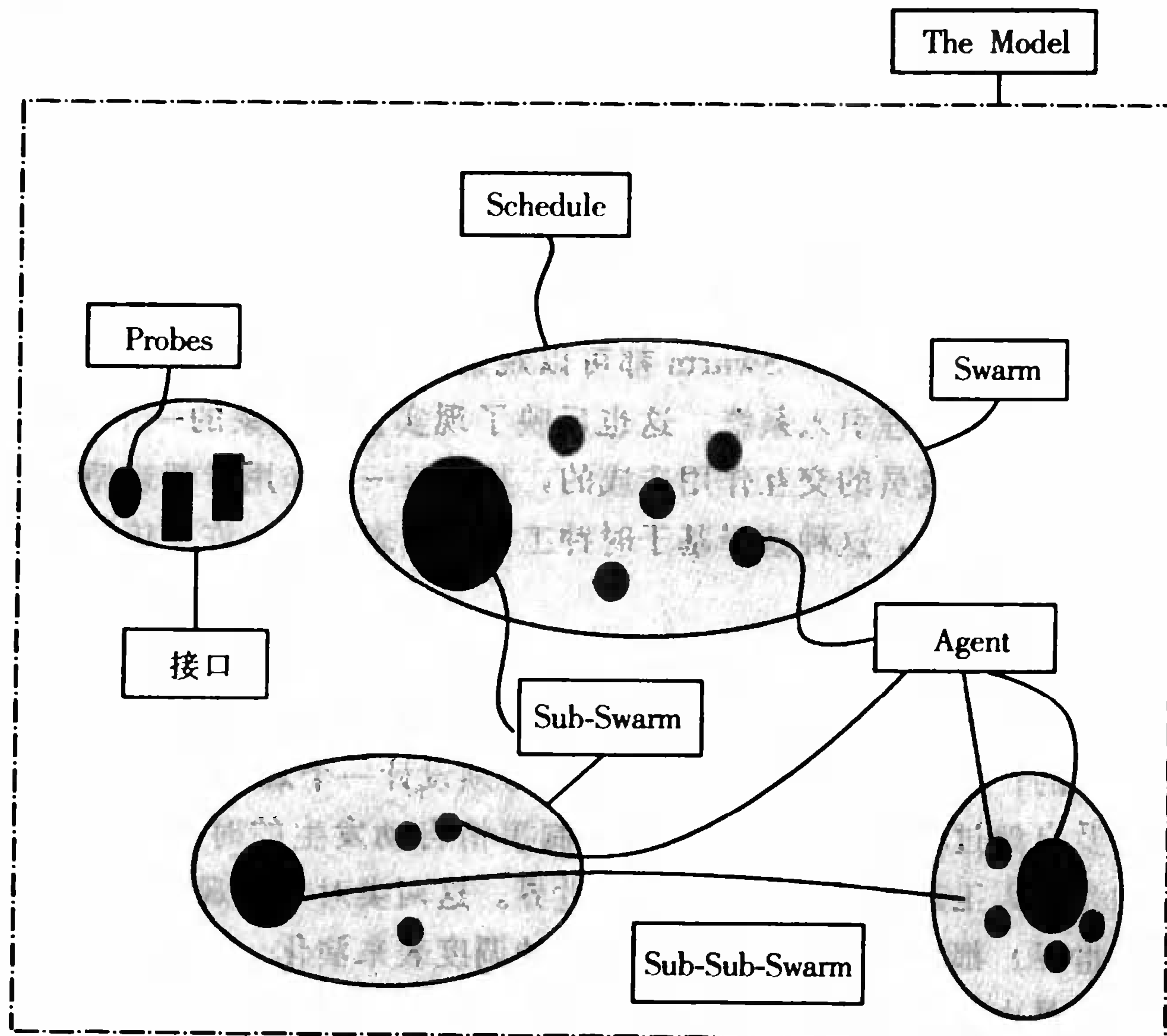


图 4—1 Swarm 的嵌套结构

在用 Swarm 建立模型的过程中，我们始终坚持这样的原则：模拟的是简单的单位而不是巨大而复杂的单位；运用局部控制而非全局控制；让系统行为从低层涌现而不是自上而下地做出规定。使用 Swarm 库，用户可以建立一个相互独立的、异质的主体集合，主体间通过离散事件相互作用。Swarm 对模型中基本元素的相互作用模式和模型世界没有隐含的限制。

二、Swarm 模型的结构

Swarm 应用的逻辑结构围绕着“Swarm”这一概念。“swarm”是 Swarm 模拟的基本构造块，一个“swarm”是一系列对象以及对象行为时序表的组合。对象集合相当于实体，时序表相当于对象向前移动的时间指向。

一个 Swarm 模型至少要包括一个模型 Swarm (ModelSwarm) 和一个观察者 Swarm (ObserverSwarm)，其结构如图 4—2 所示。

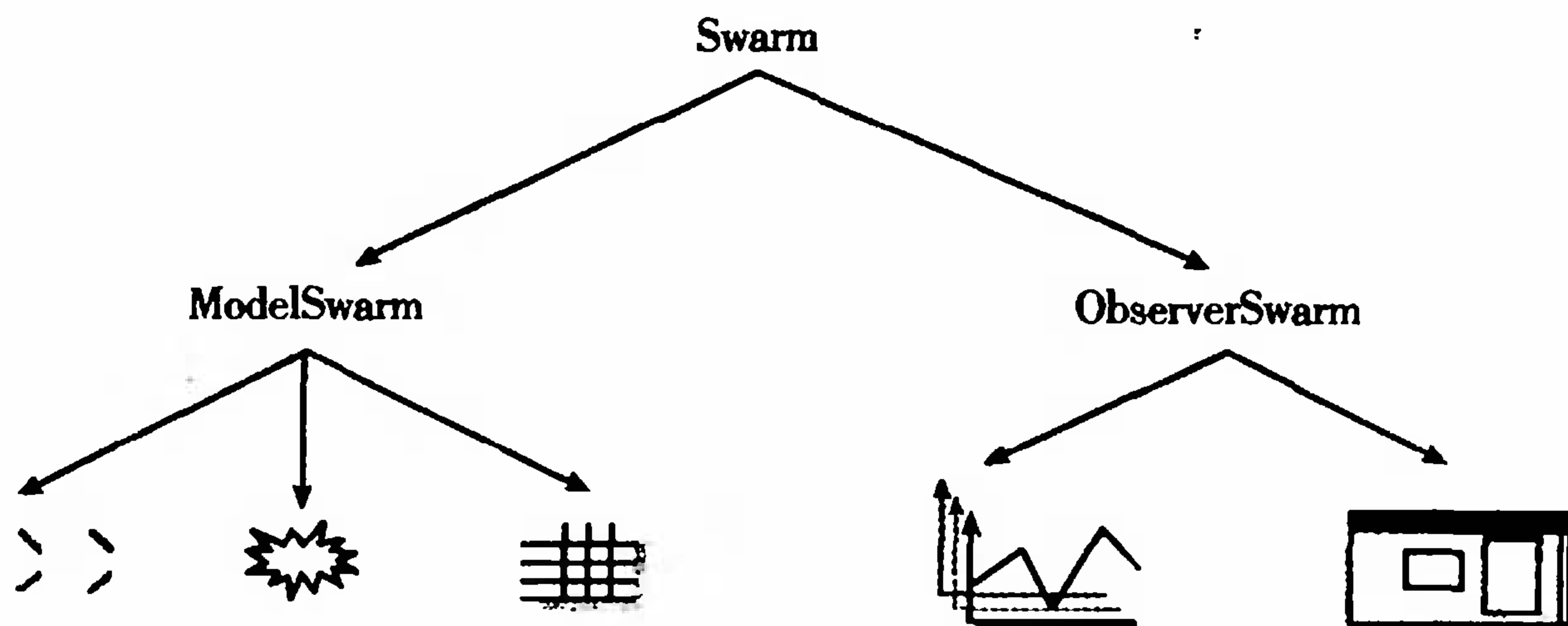


图 4—2 Swarm 模型的结构

模型 Swarm (ModelSwarm)

通常情况下，Swarm 应用包括两个 swarm 对象：ModelSwarm 和 ObserverSwarm，其中 ModelSwarm 是核心，它是一个封装模拟模型的 swarm 对象。

ModelSwarm 中的每个对象对应于模型世界中的一个主体。例如，在“热虫模型”（原 Swarm 包带的经典模型例子）中，HeatbugModelSwarm 包括一个“热虫”个体的集合，一个 HeatSpace 用来表示这个世界的物理空间属性，一个 Grid2d 用来存储个体的位置。当定义好全部主体对象并为它们建立起关系后，这些主体对象都要放到 ModelSwarm 对象中。

除了作为对象的集合，ModelSwarm 还包括模型中的行为时序表。时序表是由模型设计者编写的，用来规划主体的一系列具有特定顺序的行为，从而体现出模型中的时间。时序表用 activity 库中的 schedule 类来实现。比如在“热虫模型”的时序表中，每个时刻需要修改 HeatSpace 世界中的散发热量，每个“热虫”个体按指定的步长和方向自行移动，改变其当前所在的位置。

另外，ModelSwarm 还包括一系列输入和输出。输入的是模型参数，如对象的个数初始值等；输出的是要观测的变量的值以及模型的运行结果。如“热虫模型”中，HeatbugModelSwarm 的输入是模型参数（模拟世界的大小，“热虫”的数量和热量的散发率等）；HeatbugModelSwarm 的输出是可观察的模型的运行结果（如“热虫”的个体行为，热量在整个世界中的分布等）。

观察者 Swarm (ObserverSwarm)

对于计算机仿真来说，拥有一个可运行的模型并没有什么实际用处，我们还需要通过数据收集工具来观察模型，并记录模型内发生了什么。在 Swarm 中，数据收集是通过 ObserverSwarm 对象来实现的。ObserverSwarm 是一个特殊的对象，可以通过探测器 (Probe) 接口观察其他个体的变化情况。

ObserverSwarm 也是一个“swarm”，因此它同样包括一组个体和一个行为时序表。ObserverSwarm 的个体是用来观测的探测器以及输出界面，如图表、二维格点等；其行为时序表则用来描述各个探测器采样的间隔和顺序。

在图形模式下运行时，ObserverSwarm 对象大部分被用作用户界面的媒介。例如，在“热虫模型”中，HeatbugObserverSwarm 能够产生平面光栅图、线状图、柱状图以及探测器等。所有这些对象都与 HeatbugModelSwarm 相关以读取相应的数据，然后将这些数据传递给图形界面对象进行输出，以供建模者方便地分析运行结果。

ModelSwarm 和 ObserverSwarm 的合并

把 ModelSwarm 和 ObserverSwarm 合并起来，就形成了一个完整的实验模型。这种分层设计的“swarm”思想，分离了模型的数据收集部分和模型的实现部分，这样，模型（ModelSwarm）就像一个玻璃罩中的模拟世界，不同的观察者（ObserverSwarm）可以实现不同的数据收集方式，使用不同的控制协议，相当于在玻璃罩外调节不同 ObserverSwarm 视角，不会对模型本身的运行造成影响。

具体实现时，两类 Swarm 的合并过程是：

- (1) 先建立 ObserverSwarm；
- (2) 在 ObserverSwarm 中建立 ModelSwarm，作为 ObserverSwarm 自身的一个子 swarm (SubSwarm)，并为它分配一定的内存空间；
- (3) ModelSwarm 建立模型的主体 (agent) 以及主体的行为。从宏观上来看，一个 Swarm 模型的结构如图 4—3 所示。

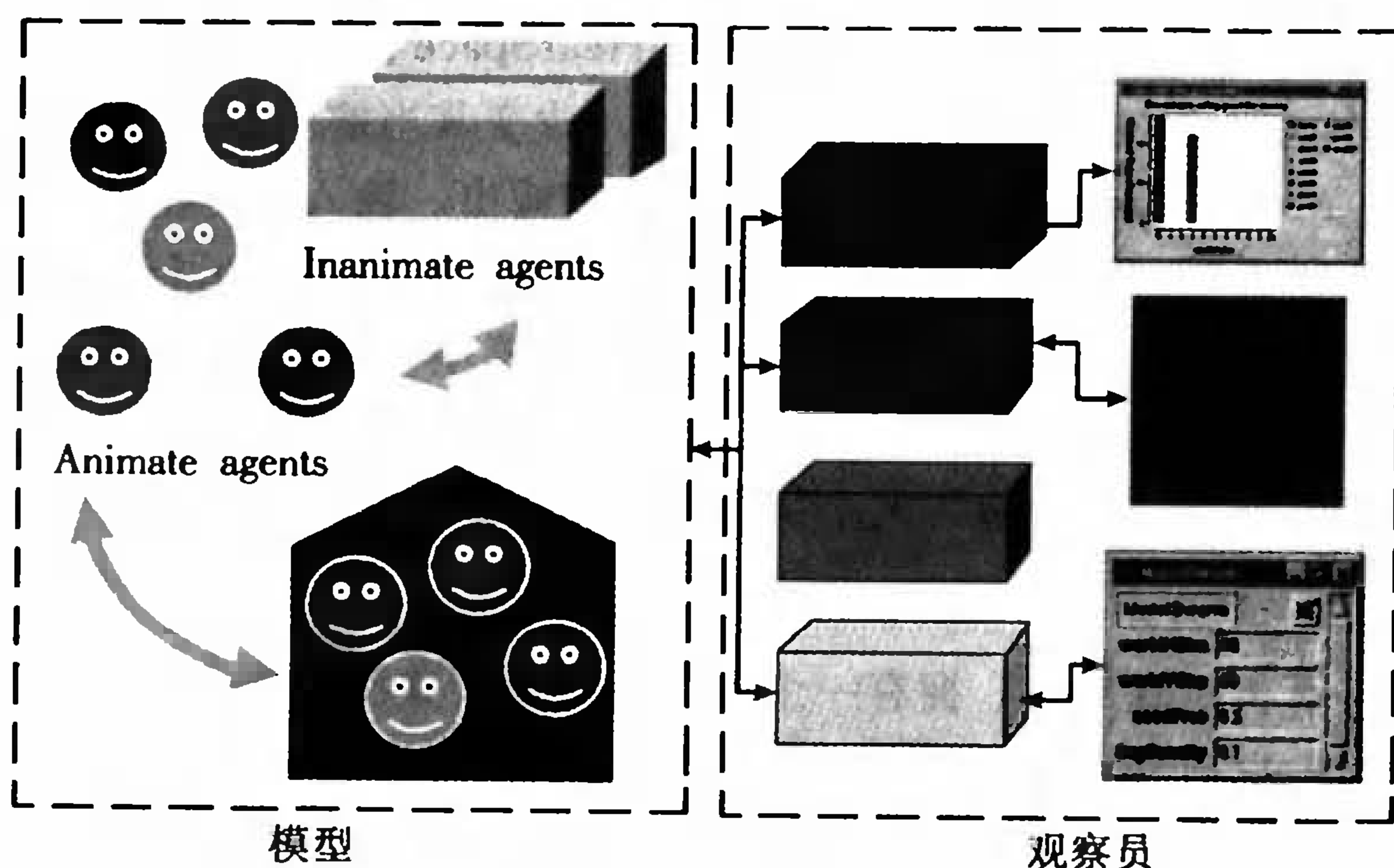


图 4—3 Swarm 模型的结构

第三节 Swarm 的类库

一、Swarm 的基本框架

为了建立一个模拟环境，建模者需要构造一系列对象用来表示现实生活中的主体。大多数情况下，这些对象都可以基于 Swarm 库中已经设计好的类来建立，免去了用户大量事务性的烦杂工作。

Swarm 有 7 个核心库：Defobj, Collection, Random, Tkobjc, Swarm-object, Activity 和 Simtools。其中，前 4 个是软件支持库，因此也可能被用在 Swarm 之外领域中；后三个则是 Swarm 模拟库。

Swarm 库的基本框架结构如图 4—4 所示（注：这里并没包括所有的 Swarm 类库）。

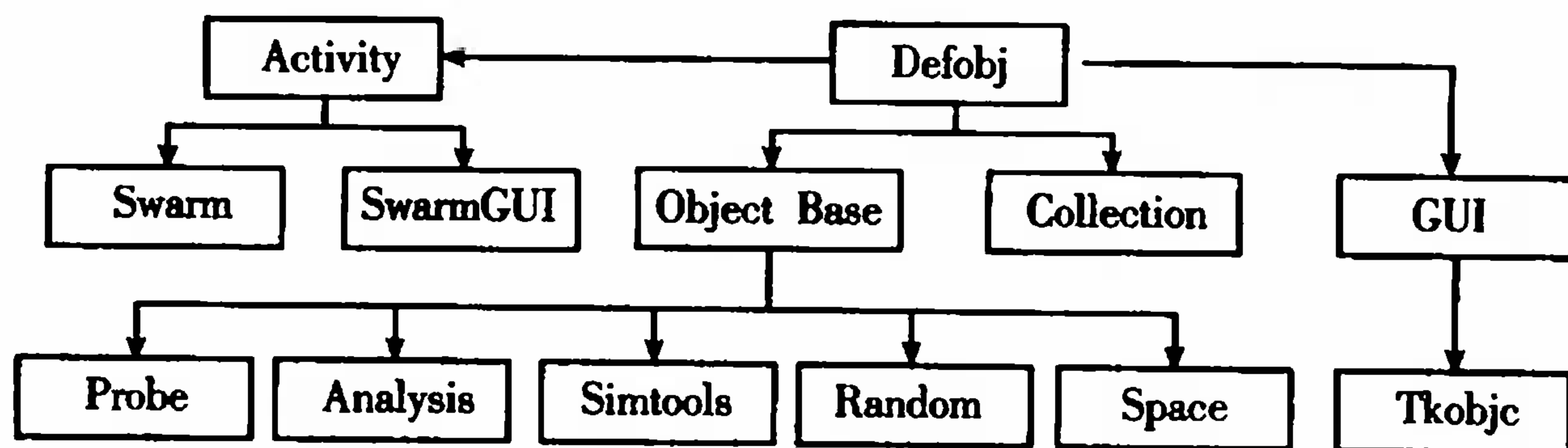


图 4—4 Swarm 库的结构

下面分别介绍 Swarm 的几个主要类库。

二、软件支持库

软件支持库包括 Collection, Defobj, Random 和 Tkobjc，这些类库是基本类库，主要封装了一些用来编写高效软件的基本工程性事务。这部分内容对于初级模型设计者来说可以跳过，而对于有计算机软件专业背景的研究者来说，这部分内容与别的通用库也大同小异。

Collection

Collection 用于管理集合类，如：匹配图（Map）、列表（List）、集合（Set）等。这些类中的方法允许向集合中的所有成员发送消息、增删检索成

员、排序、循环遍历成员等。

Collection 库主要的子类包括 Array, List, Set 和 Map, 如图 4—5 所示。

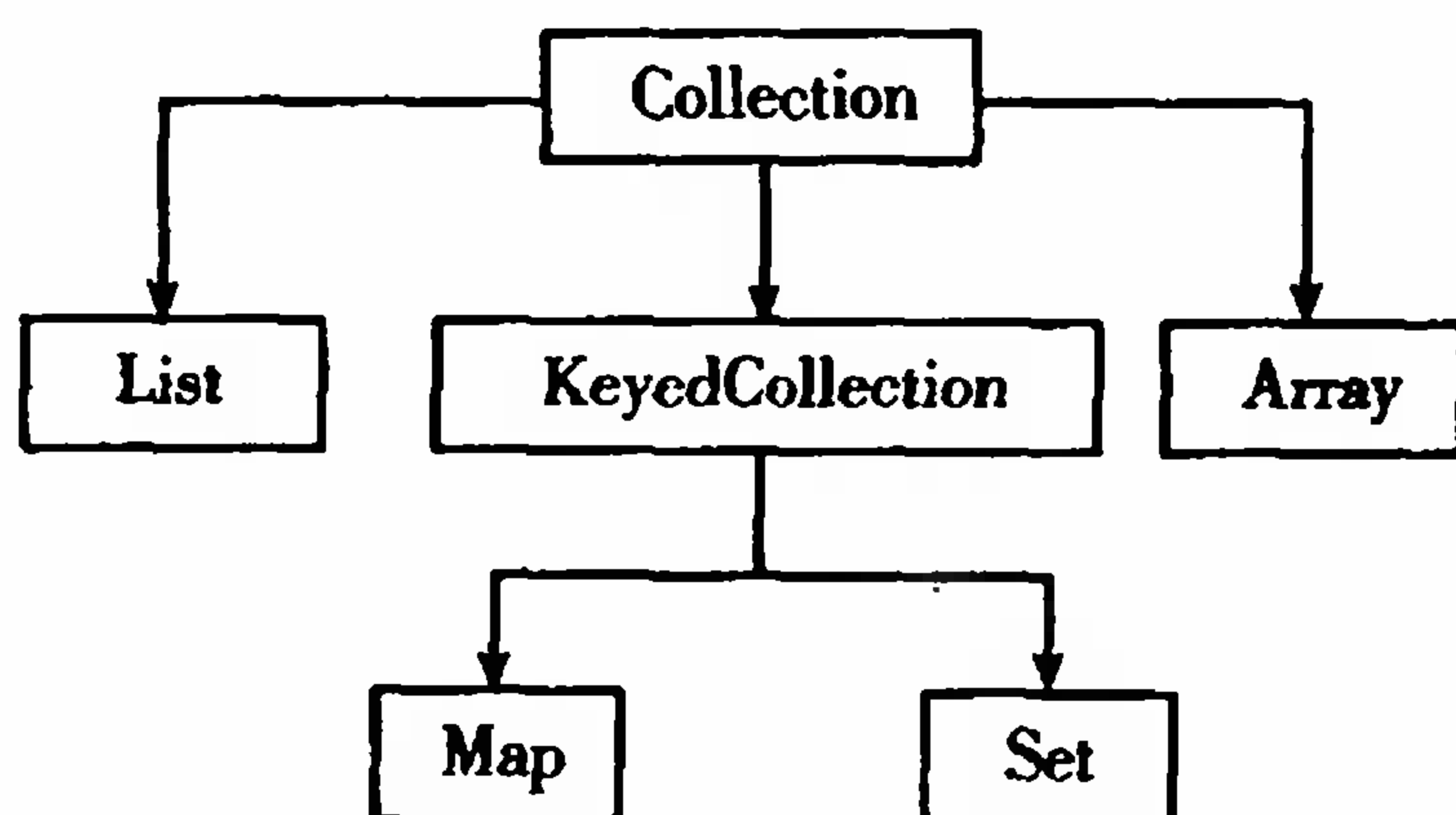


图 4—5 Collection 库的结构

图中, List 是根据建立主体成员的先后顺序建立的一个线性列表。Array 是 Collection 成员的集合, 通过 Array 这个固定的数据结构, 根据每一个成员偏移量, 能够很快计算出其位置。KeyedCollection 中包括 Map 和 Set 两个类, Map 用于建立从 key objects 到 member objects 的联系; Set 中的每一个主体的 key value 是由主体自身确定的, 它是和主体一一对应的。

Defobj

Defobj 定义了 Swarm 对象创建和析构的基本方法, 提供了对消息、错误处理、调试和内存分配的支持。同时, 它支持对象接口 (Interface) 和实现 (Implementation) 的分离, 从而使 Swarm 模型程序的层次更加清晰, 实现不同的对象间以相同的接口调用访问, 使得对象设计的高度抽象和重载定制更为方便。

Random 随机数库

Random 库提供一套随机数发生器和基于伪随机数流的统计分布。在计算机模型模拟中, 随机数生成器的质量非常重要, 如果生成的随机数有偏差或具有较高的相关性, 就容易导致错误的结论。随机数库支持正态分布、均匀分布、高斯分布以及指数分布等多种随机分布。由于这个库本身就是面向对象的, 因此可以简单地生成多种独立的随机数流, 这有助于检验实验的可重复性。

Random 库主要包括 Generators 和 Distributions 两个子类, Generators 用来产生随机数序列的“种子” (seed), Distributions 对象产生随机数的序列。这样, 我们就可以从某种分布中获取随机数序列。具体过程是由 Generators 所提供的“种子”触发 Distributions, 从而产生一个随机数序列, 以供建立模型时使用。

Tkobjc

Tkobjc 库是一个基于 Tcl/Tk 的图形用户界面库, 实际上是 Object C 调

用 Tcl/Tk 的一个语言转换接口。同时它也是基于 Windows X 的。Tkobjc 中的类封装了用于制作用户界面的基本对象：按钮、窗口、直方图、折线图、表单等。如果 Tkobjc 类的功能不能完全满足用户的需求，用户可以使用更底层的 Tcl/Tk 来编写用于特定目的的代码。

Tkobjc 库主要包括 Graph、Histogram 和 ZoomRaster 三个子类，如图 4—6 所示。其中，Graph 用来定义矢量图表；ZoomRaster 用来定义显示光栅图；Histogram 用来显示柱状图。

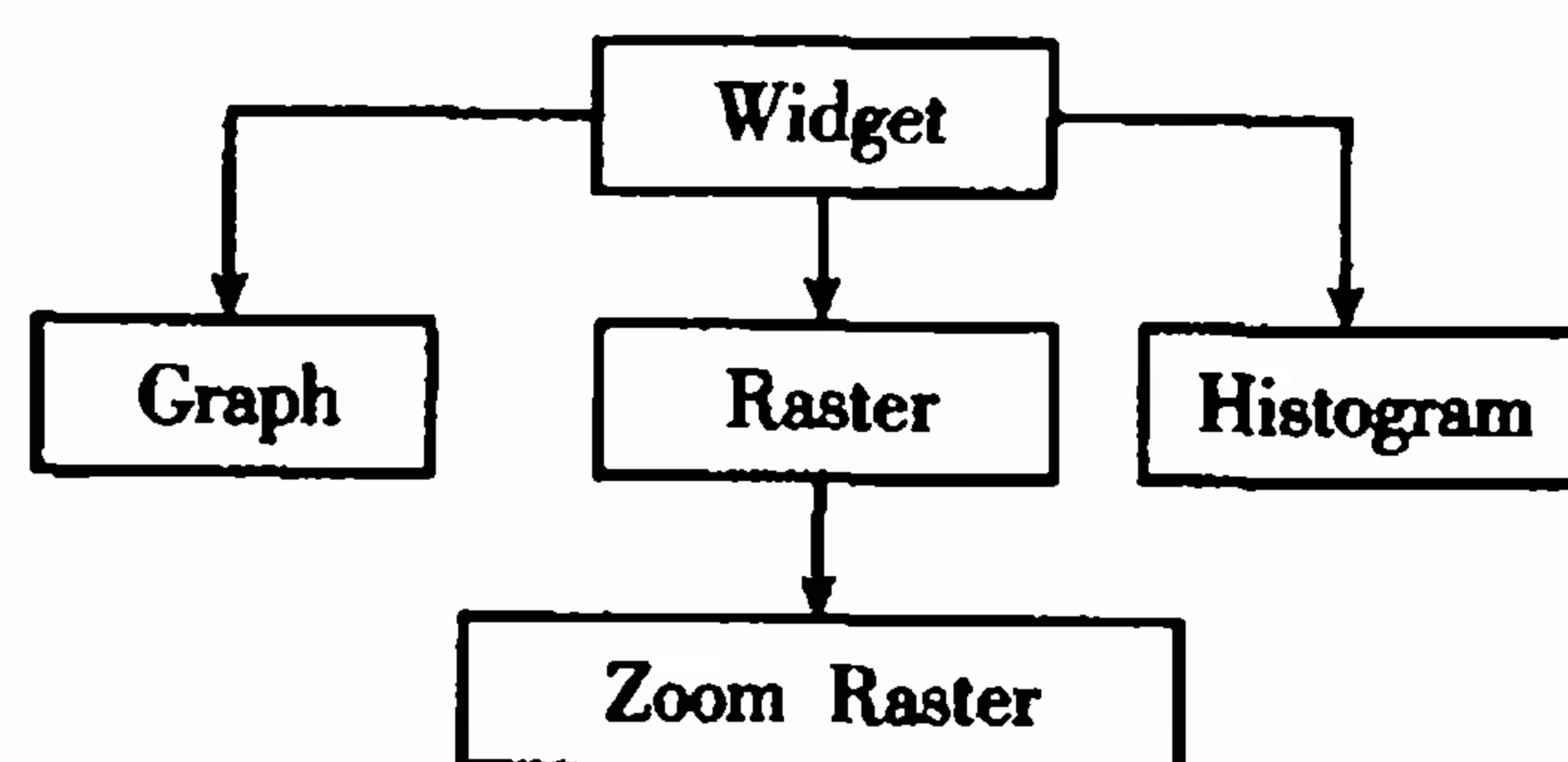


图 4—6 Tkobjc 库的结构

三、模拟库

模拟库是 Swarm 类库中抽象程度最高的类库，也是最能体现 Swarm 建模思想的类。理解这个类库中的概念和掌握其中所有类的用法是设计好一个 Swarm 模型的关键。模拟库包括 Swarmobject, Activity 和 Simtool 等。

Swarmobject

Swarmobject 库包括作为 Swarm 模型基础的核心类。这个库包括两个重要的类：Swarmobject 和 Swarm。Swarmobject 是所有模拟主体类的根类，所有主体类都要从这里继承行为，同时，Swarmobject 还定义了内存管理的基本接口和对探测器的支持。另外，Swarmobject 库中的 Swarm 类是 ModelSwarm 和 ObserverSwarm 的基类。

Activity

Activity 库包括 ActionGroup 和时序表 Schedule，在模型设计中它们充当模型心脏的构造者，为模型的动态运行提供动力机制。Actiongroup 相当于一系列动作的计划，由主体的一系列动作所构成，把在同一时间各个主体的不同行为集合在一起了。时序表是模型运行的时序列表，用户可以将周期性执行的动作按顺序放入这个数据结构中，并指明运行间隔和触发条件，这样，模型就可以按照时序表中的约定运行，而不再需要人为的干预。

Simtool

Simtool 库中包括控制探测器 (Probe) 运行的类, 它支持两种操作模式, 一种是交互探测的图形模式, 另外一种是在脱机数据收集的批处理模式。用户可以在模型运行的过程中观察或者修改变量。Simtool 还提供了数据分析和输出显示的支持。能够产生统计数据的汇总、时序图等。数据分析对象完全按它们的应用分类, 用户可以通过在被观察的对象中建立探测器来指定收集哪些数据。

“探测器”技术是 Swarm 对标准 OO 编程的一个贡献。在大多数计算机程序中, 程序只需去做它被设计的本职工作, 例如 Windows 不会丢失你的文件, 字处理软件能够打印你的文章。而在模拟中, 模型不仅要能模拟真实, 还要能够方便地从外面进行观察其内部的状态变化, 研究者应该能方便地从正在运行的模型中取出有用的数据。Swarm 系统为模型中的每个对象定义了可被探测的能力。“探测器”允许用户显示或设置任意对象的状态, 而不需要额外的用户代码去改变已有的程序。Swarm 所提供的探测器技术如图 4—7 所示。

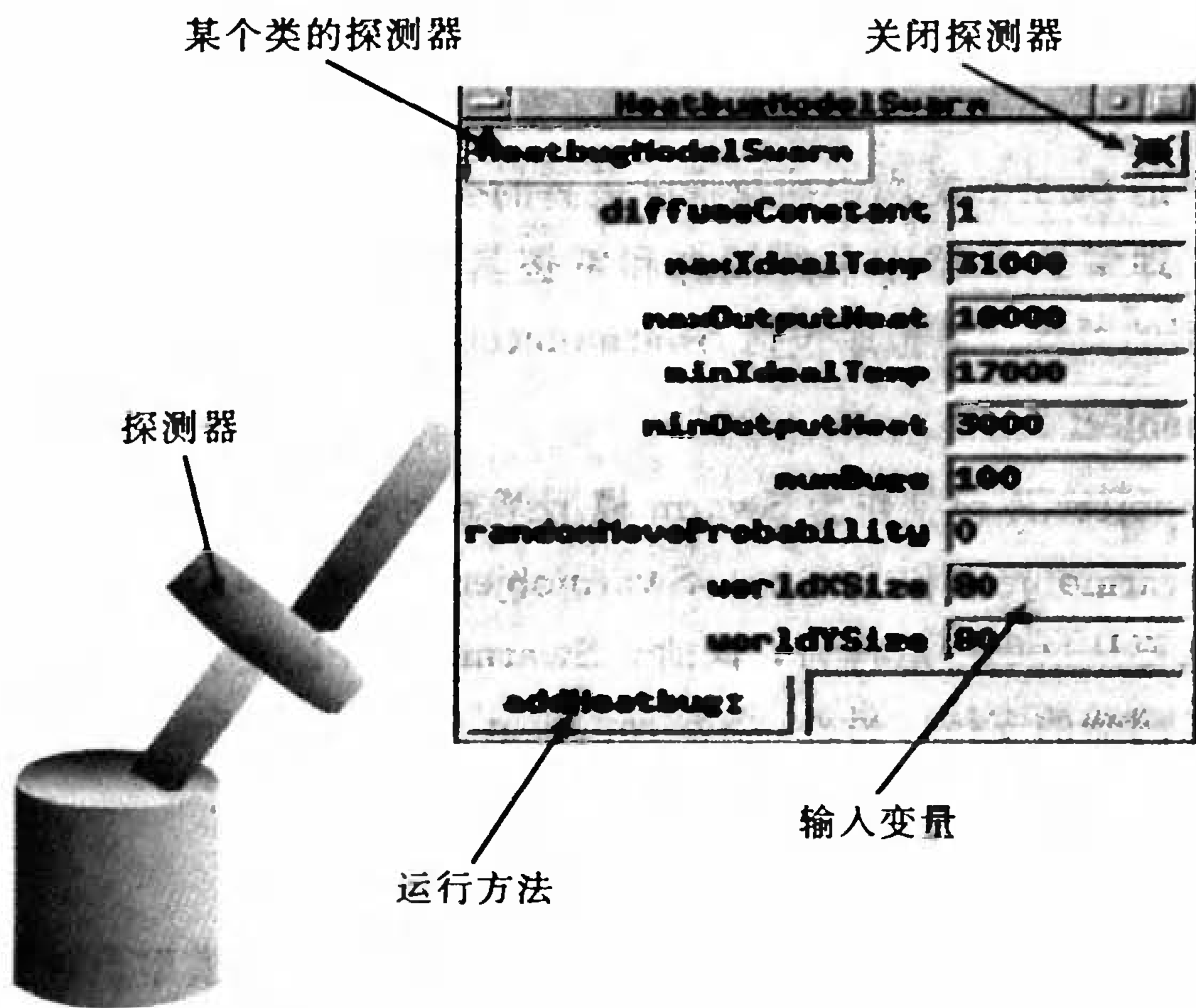


图 4—7 Swarm 提供的探测器技术

四、建模专用库

除了提供软件支持库和模拟库以外, Swarm 还提供了一些用于专用建模领

域的可选库，如对二维空间、遗传算法（Ga）和神经网络（neuro）的支持等。Ga 和 neuro 由 Juan J. Merelo 在访问圣菲研究所时编写的。其中 Ga 提供一系列基本遗传算法类，neuro 实现一系列神经网络。同时，由于 Swarm 支持用户开发自己的专用库，因此还会不断地有一些第三方开发的专用库增加进来。

第四节 Swarm 的安装与配置

随着国内越来越多的研究者开始接受复杂性思维和多主体建模的研究方法，应用多主体仿真建模平台 Swarm 的研究也越来越多。在实践中，很多初学者或是非信息相关专业的研究者经常对 Swarm 的系统构成、原理、安装和配置等感到困惑，本章我们将针对这种情况给出一些问题的解决方法。

一、Swarm 的建模环境

Swarm 建模环境的架构有多种选择。Swarm 库本身是在 Unix 系统中用 Object-C 语言开发的，所以在 Unix/Linux 下用 Object-C 设计模型是最为直接的一种方式，这样一个建模环境的架构最为简单，一般 Unix/Linux 的缺省安装都已经提供了 Object-C 编译器，可以下载 Swarm 的源程序包，在自己的系统上编译生成库，然后用同样的方式设计模型程序。这种方式的优点在于，可以深入了解 Swarm 的内核，必要时甚至可以修改库中的代码，由于模型与库之间的连结是无缝，可以生成一个独立发布的可执行程序，模型执行效率高，模型的规模只受内存和 Unix/Linux 对进程的配额限制。大约每 128M 可支持 1 万个 Swarm 主体，可以参考这个数字选择配置系统的内存。

对熟悉 Java 语言的模型设计者来说，如果仍然在 Unix/Linux 中设计模型，情形则稍有不同。Swarm 基本库中有一个为 Java 用户准备的 Java 本地化接口（JNI）库 Swarm.jar，模型设计者只需要通过这个接口来调用 Swarm 库中的各种基本构件。由于最终还是用到了与平台有关的本地化库的代码，所以采用 Java 设计模型并不能享有 Java 的各种优良特性，这种选择惟一的好处是，对 Java 用户来说掌握模型的设计更容易了，代价是模型的规模受 Java 虚拟机的内存限制。在设计一个主体数量非常多的大规模的模型时，如果没有超越机器的内存限制而受限于 Java 虚拟机，可以重新配置 Java 虚拟机增加它的内存配额。

对于 Windows 下的用户来说，情形则更复杂一些：必须在 Windows 之上安装一个 Linux 模拟环境 Cygwin，才能调用原来在 Unix 下开发的 Swarm 库。

在 Swarm 2.1.1 版中, 提供了一个 Windows 下的安装包, 其中集成了 Cygwin, 用户就无须自己再安装 Cygwin。在 Windows 程序组中有一个 Terminal 的选项, 打开它就是一个 Cygwin 的 Bash 环境, 可以使用 Linux 下的常用命令, 还可以用命令行的方式使用集成的 Object C 编译器。如果下载了没有集成 Cygwin 的版本, 自行安装 Cygwin 时, 需要注意的是除了 Cygwin 缺省安装外, 还需要安装一些图形显示的库, 如 Tcl/Tk 语言库和 Blt24 库等, 这些库是 Swarm 图形界面所必须的。

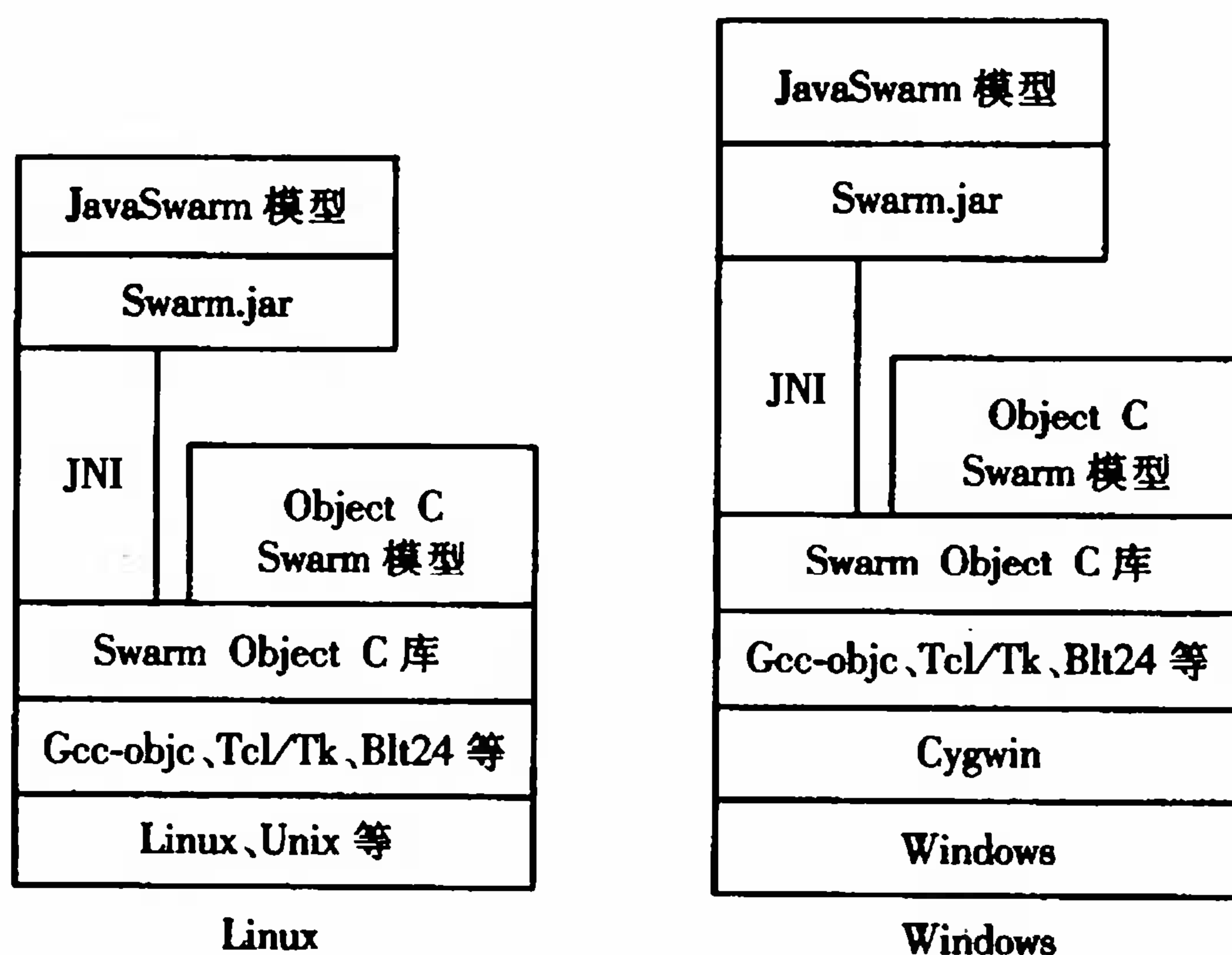


图 4—8 Swarm 的体系结构

在 Windows 下开发模型时, 模型的规模要受 Cygwin 的内存限制, 因为 Cygwin 也相当于在 Windows 中的虚拟机, 缺省的内存配额只有 128M。

从上面的分析可知, 用 Java 语言和在 Windows 之上用 Cygwin 设计模型都会对模型的规模造成一定的限制, 而且, 由于 Java 和 Cygwin 都不是直接调用原来 Swarm 基本库的二进制代码, 所以在模型效率上也会有很多损失。如果希望在 Windows 系统上用 Java 设计模型, 从模型的角度来说, 因为是在 Cygwin 虚拟机中的 Java 虚拟机内运行, 所以应该是最坏的组合, 然而, 对模型设计者来说, 容易学习更重要, 所以仍然是最常选择的模型设计环境。而另外一方面, 这种两层嵌套机制给模型设计者带来了许多迷惑, 很多初学者常常困扰于环境的配置而不能入门。最好的选择依然是 Swarm 2.1.1 的 Windows 安装包, 事实上, 这个安装包不仅仅集成了 Cygwin, 也自带了一个 Cygwin

下的 Java: Kaffe Java, 模型设计者可以在这个 Cygwin 下直接用 JavacSwarm 脚本编译模型, 用 JavaSwarm 脚本运行模型。

下面我们以 Swarm 2.1.1 版为例分步骤介绍 Windows 平台下 Swarm 的安装和配置。

二、安装与配置指南

(一) 软硬件要求

Swarm 2.1.1 版可以在 Windows 95/98/Me/NT/2000/XP 中运行, 满足操作系统硬件需求即可安装, 但 Swarm 运行时构建 Cygwin 和 Java 虚拟机环境会消耗大量系统资源, 为了达到更好的运行效果, 高配置的计算机系统还是很有必要的。根据经验, 计算机配置 CPU 最好在 Pentium III 以上, 内存至少 256M, 如果同时需要运行 IDE (集成开发环境, Integrated Develop Environment, IDE), 则内存需要更多。

以下过程以中文版 Windows XP 操作系统为例, 假设在 C:\model 目录中存在编写好的模型示例程序。

(二) 安装 Swarm 2.1.1

在“我的电脑”中找到安装文件 Swarm-2.1.1.exe, 双击, 出现图 4—9 所示的窗口。



图 4—9

点击“下一步”，是版权信息，如图 4—10 所示。

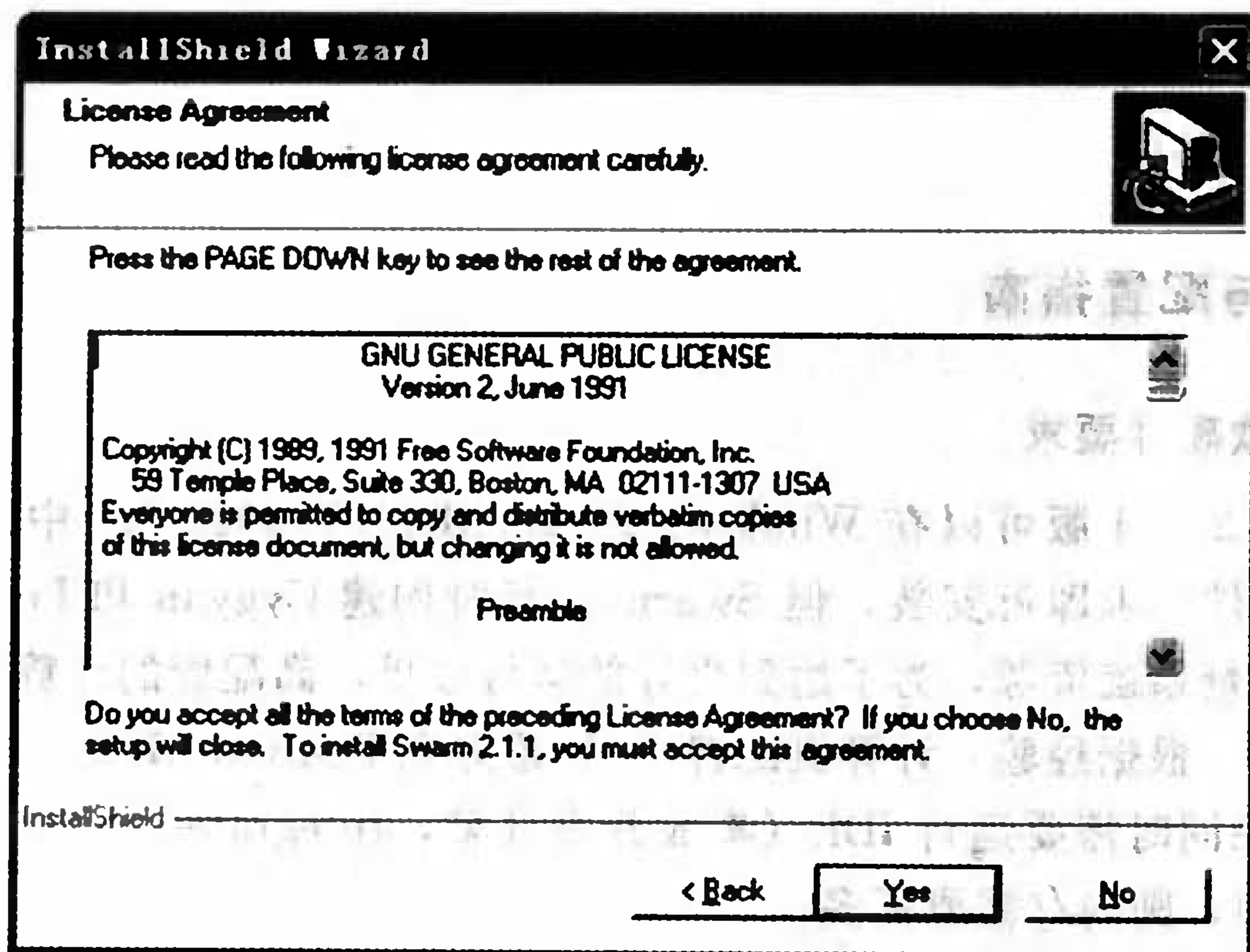


图 4—10

选择安装的位置，默认是“C: \ Swarm-2.1.1”。如果所给的目录不存在，安装程序将自动创建这个目录，如图 4—11 所示。

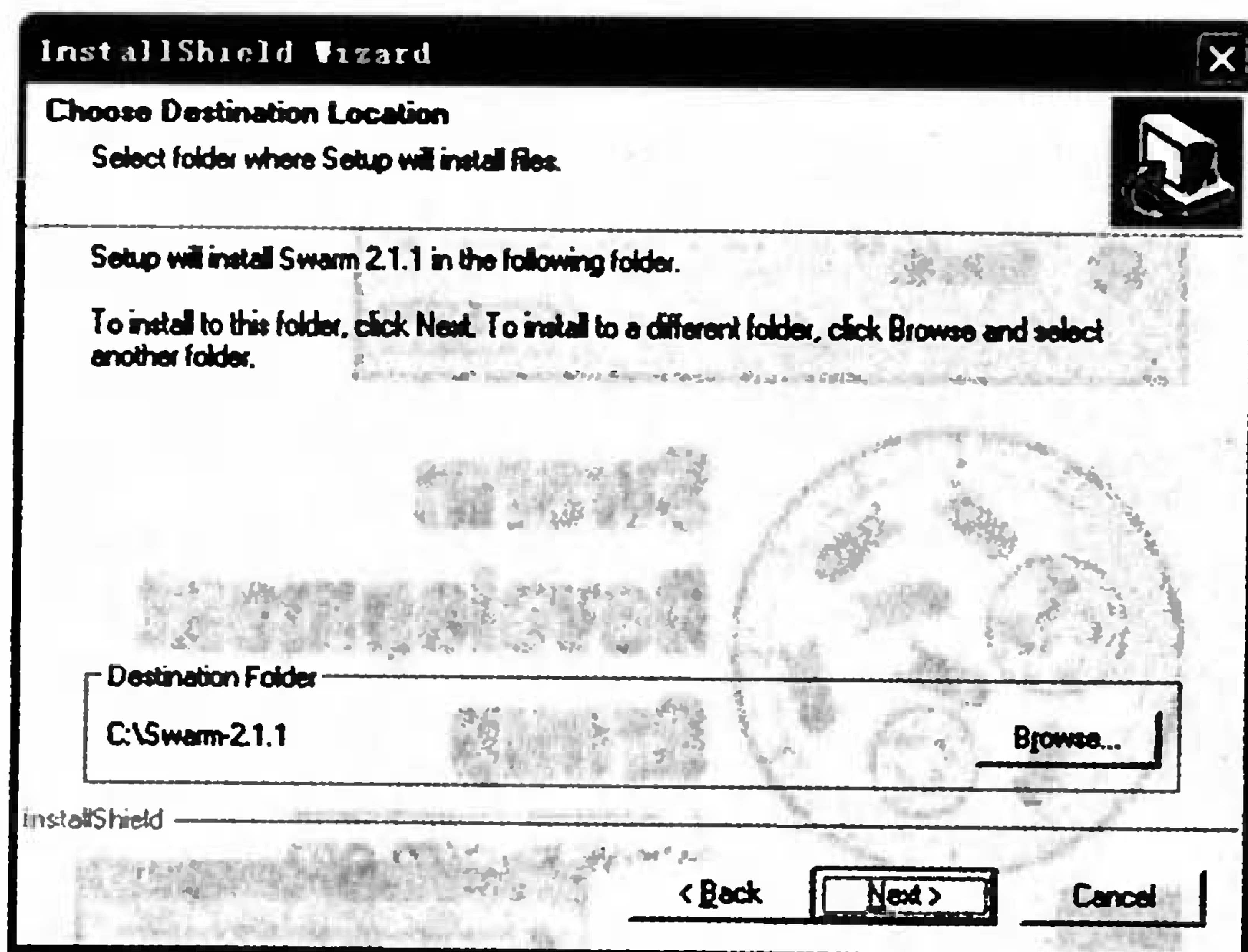


图 4—11

再次点击下一步，安装程序开始复制文件，稍后安装完成，如图 4—12 所示。

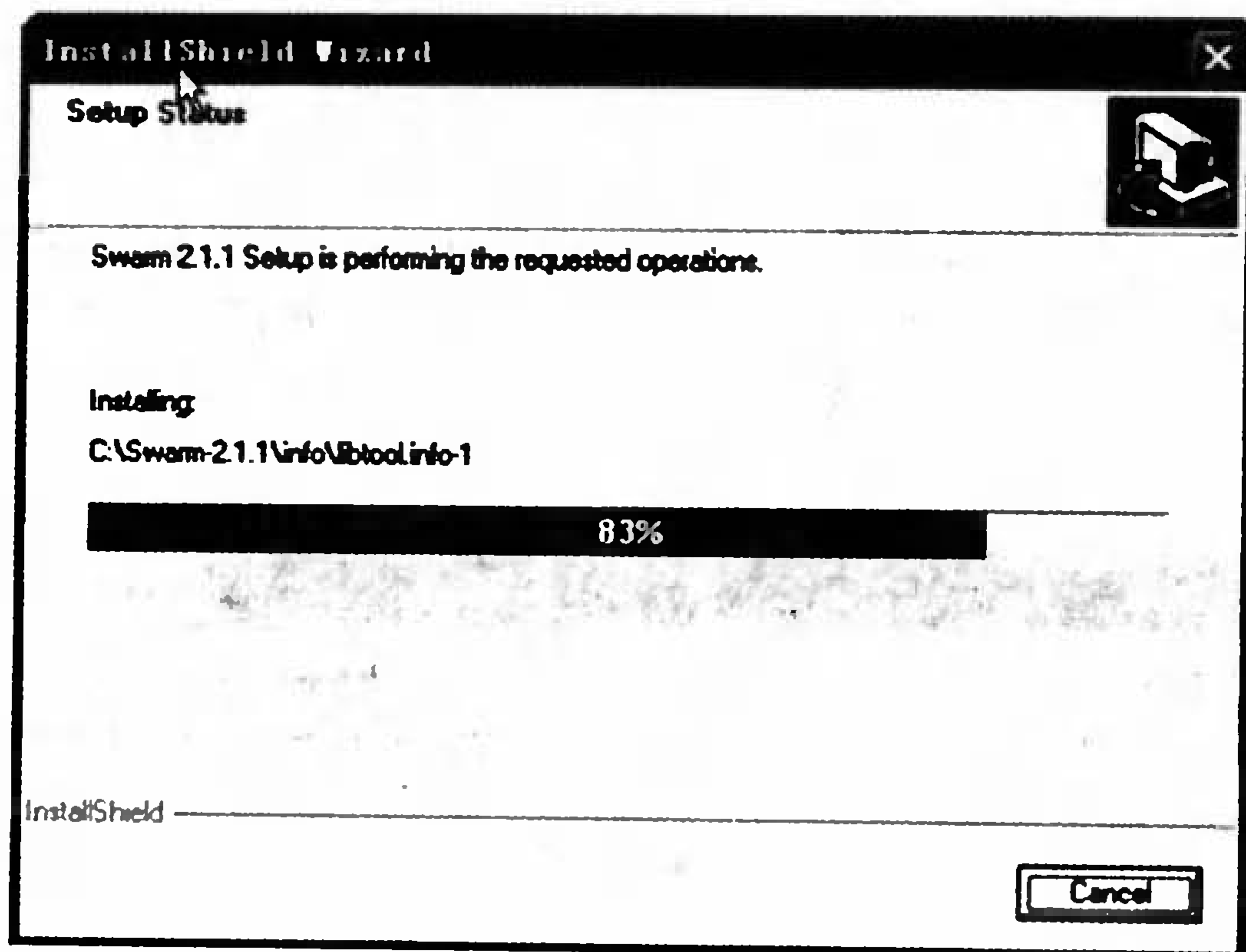


图 4—12

安装完毕后，系统环境变量将在“用户变量”中增加“SwarmDIR”一条，内容是 Swarm 安装的目录，如图 4—13 所示。

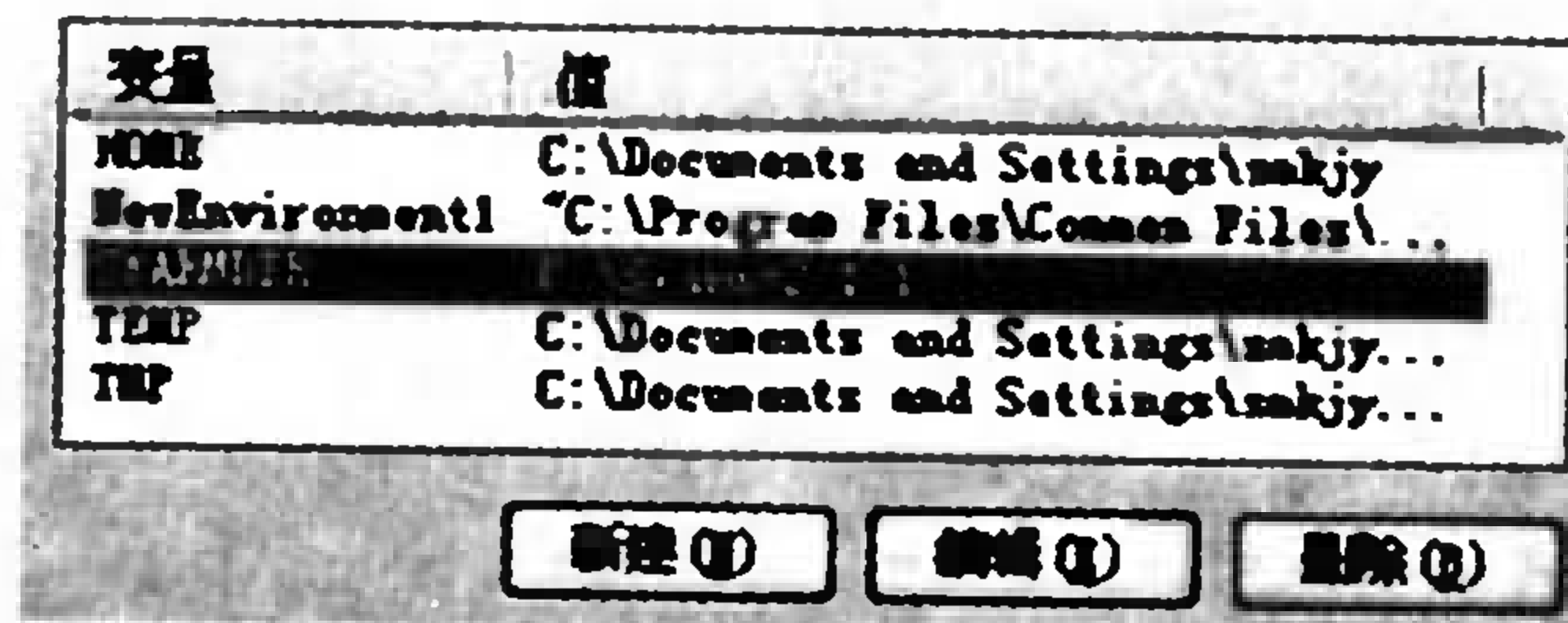


图 4—13

Swarm 2.1.1 的 Windows 安装包完整地提供了建构环境的必备软件和库；包括一个集成的 Cygwin、必须的 Tcl/Tk80、Blt24 库等，方便 Object C 编写模型的 Swarm 库，方便 Java 编写模型的 javaSwarm.dll 和 Swarm.jar，以及 Object C 编译器等。

(三) 在 Cygwin 环境下使用 Swarm

为了方便 Java 模型开发者调试，Swarm 2.1.1 的 Windows 版安装后，在安装路径内还包括一个集成在一起的 Java 虚拟机。为方便配置 Java Swarm 环境，还提供了两个脚本文件：javaSwarm（执行）与 javacSwarm（编译）。这

两个文件以批处理的方式设置了必要的系统参数和路径，如：java class 库路径、jre 路径、必要的 dll 路径等；javaSwarm 启动自带的 javaw.exe 解释执行作为参数传入的 Java 程序。这样用户就可以再编译好 Java 代码的模型后，到 Cygwin 的 bash 下用脚本文件 javaSwarm 执行模型。典型的步骤是：

在“开始”→“所有程序”（Windows2000 及以前版本中是“程序”）→“Swarm”中点击“terminal”，打开 Terminal 窗口，如图 4—14 所示，这实际上是 Cygwin 的一个 bash 环境，如果可能的话，也可以用自己安装的 Cygwin 替代。



图 4—14

如图 4—15 所示，在窗口中输入：

```
cd c:
```

```
cd model
```

以“javacSwarm *.java”编译程序，如果没有错误，会在 C:\model 目录中生成一系列文件，其中主要是类文件 (*.class)，否则会显示错误信息。

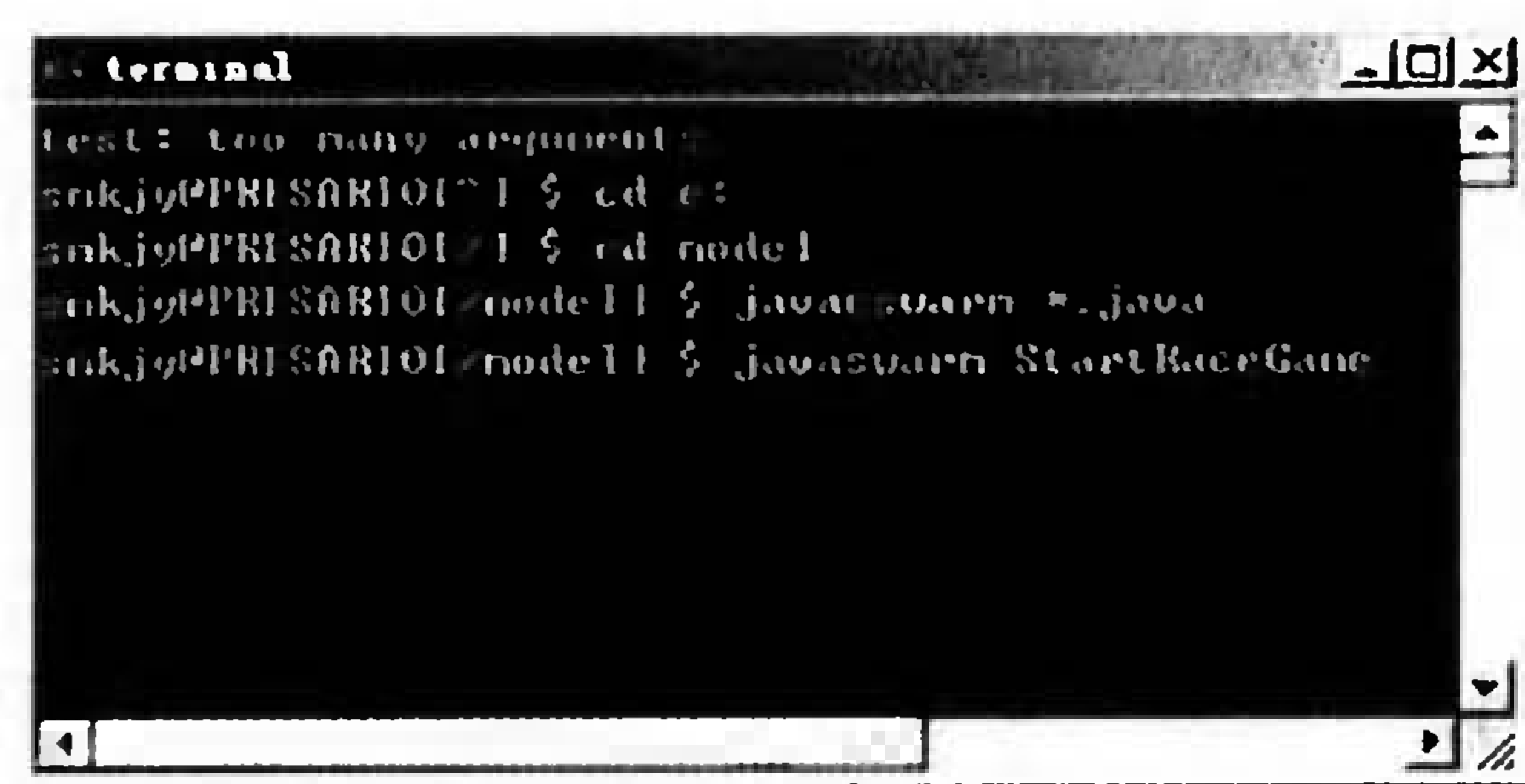


图 4—15

经过调试编译无误后，请在桌面右键→“属性”→“主题”中将当前主题改为“Windows 经典”，因为图形界面接口与 Windows XP 的默认风格有冲突，在 Windows XP 下一些模型程序可能无法运行。如图 4—16 所示。

用命令“javaSwarm StartRaceGame”运行包含 main 方法的主类，这时会出现程序面板窗口，如图 4—17 所示。此处可以修改模型的各种参数，点击“Start”，模型开始运转。

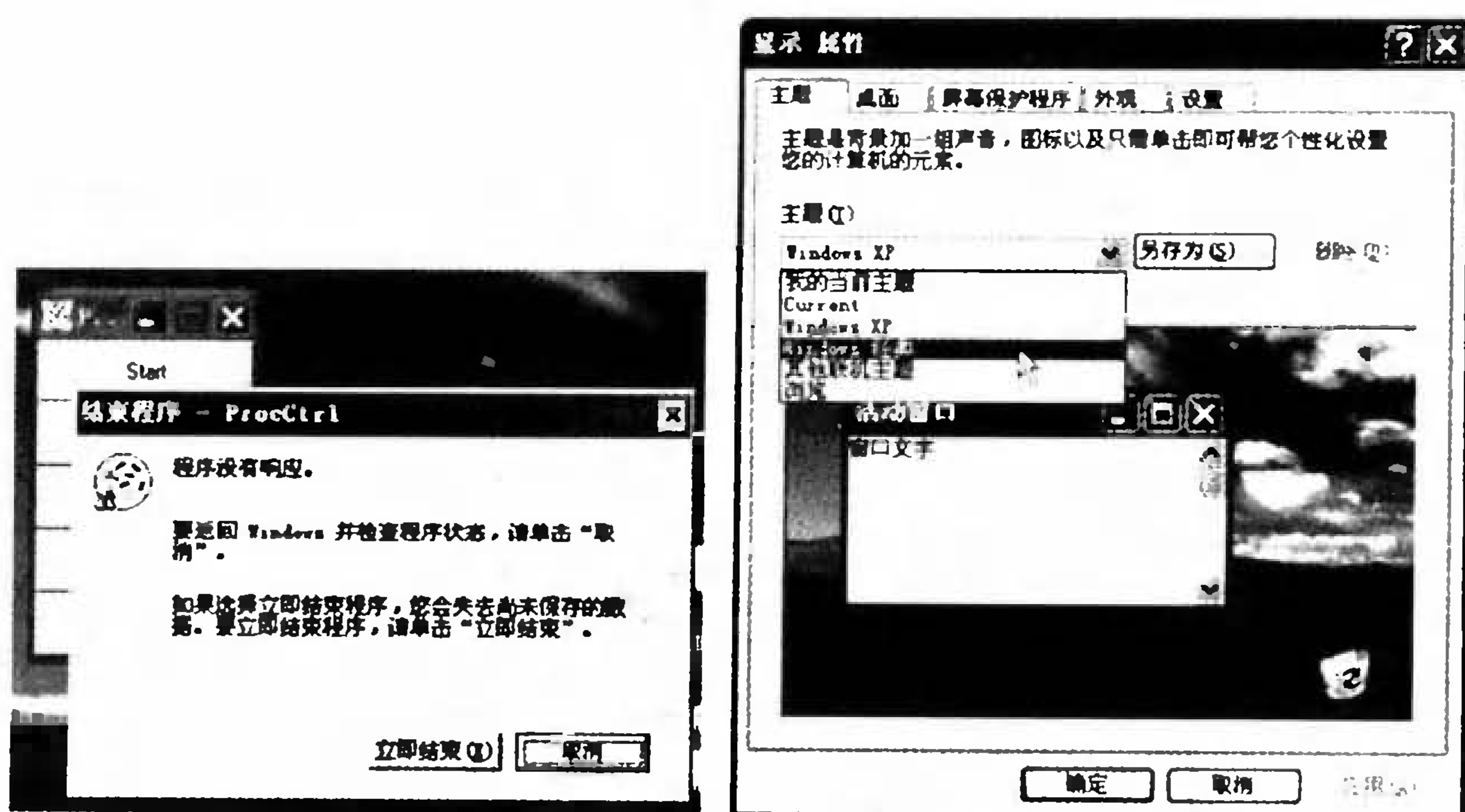


图 4—16

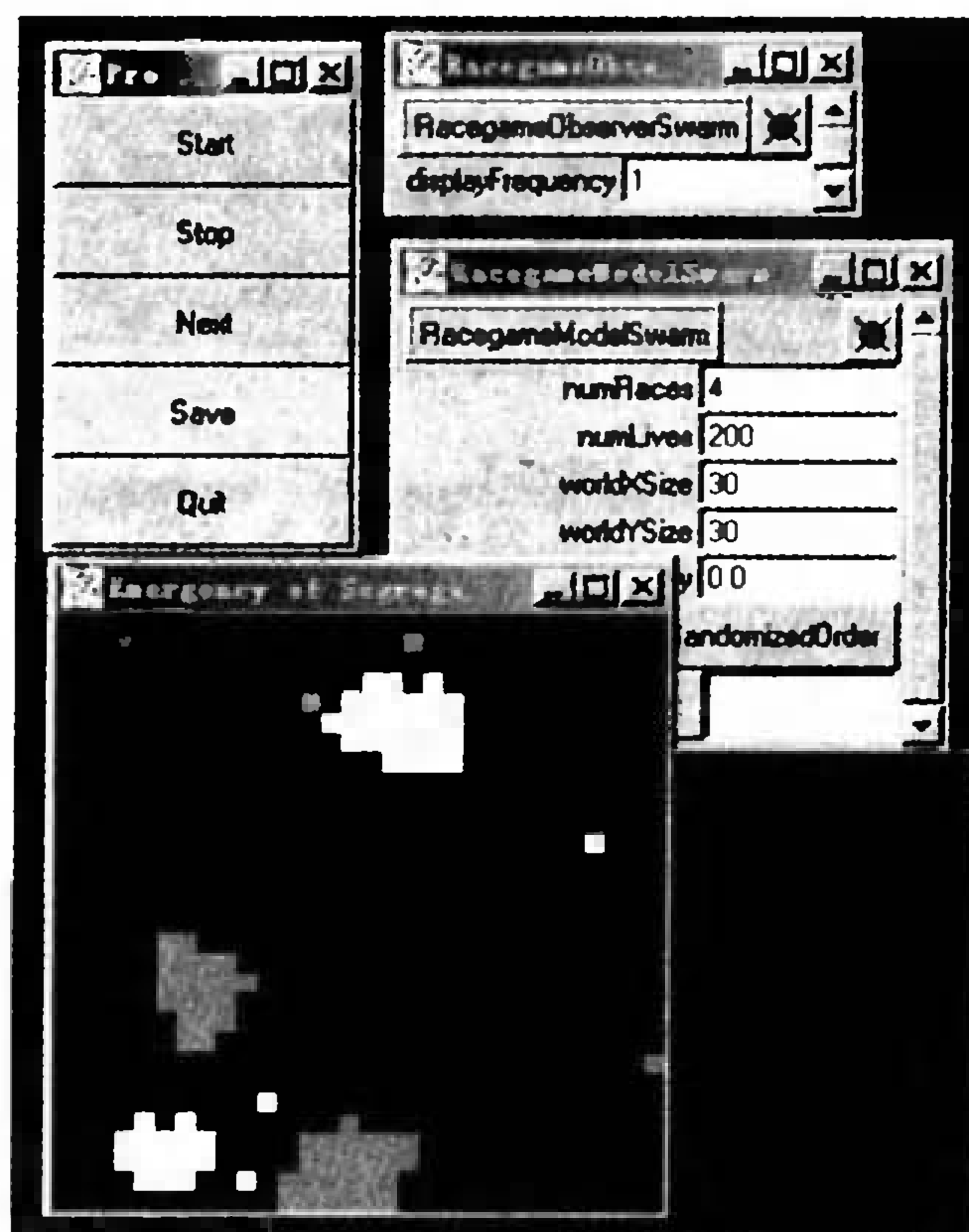


图 4—17

运行结束后，在面板上点击“Quit”结束程序，在 terminal 窗口输入“exit”退出。

(四) 在 Windows 命令行中使用 Swarm

在 Windows 命令行中使用 Swarm 首先需要安装一个 JDK，Swarm 2.1.1 版本发布时，JDK 的版本为 1.2，所以从兼容性角度来说最好用此版本的 JDK

进行编译，但模型可以正常运行在高版本的环境中（安装过程略），我们假设其安装路径为 C:\j2sdk1.4.2。

如图 4—18 所示，修改一个环境变量，具体方法是：右键单击“我的电脑”→“属性”→“高级”→“环境变量”，在“系统变量”中寻找“Path”一项，把它的内容中加入 Swarm 中 bin 目录的路径、以及 JDK 的 bin 目录路径，这里就是添加“C:\Swarm-2.1.1”和“C:\j2sdk1.4.2\bin”，路径之间用分号分隔；如果没有找到“Path”，需要手动建立这个变量。

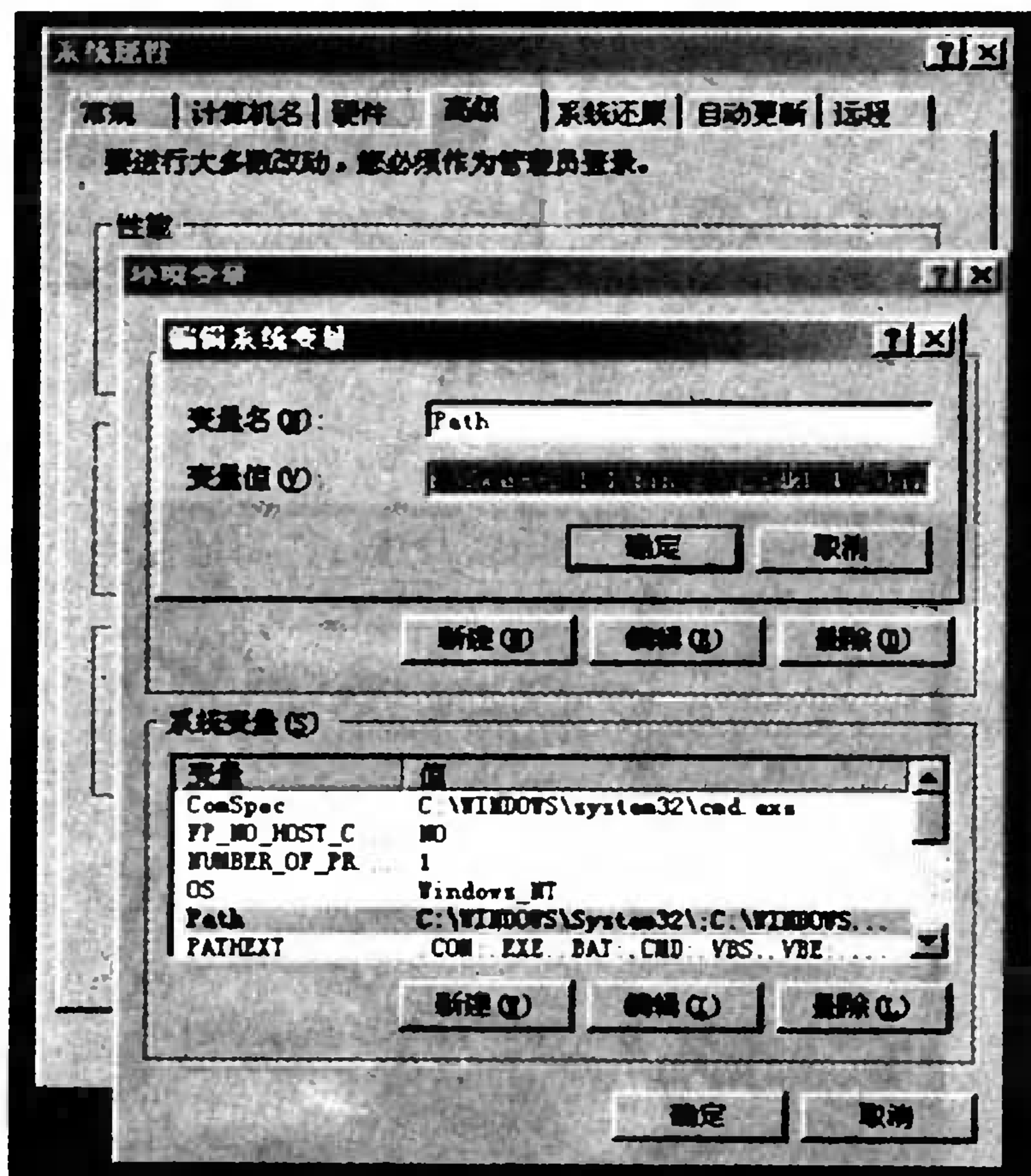


图 4—18

在“开始”→“所有程序”（Windows2000 及以前版本中是“程序”）→“附件”中点击“命令提示符”。或者在“开始”→“运行”中输入“cmd”，确认后也可以打开“命令提示符”。

如图 4—19 所示，在窗口中输入：

c:

cd \model

编译程序：

javac-classpath. ;C:\Swarm-2.1.1\share\Swarm\Swarm.jar *.java

运行程序

java-classpath. ;C:\Swarm-2.1.1\share\Swarm\Swarm.jar StartRaceGame

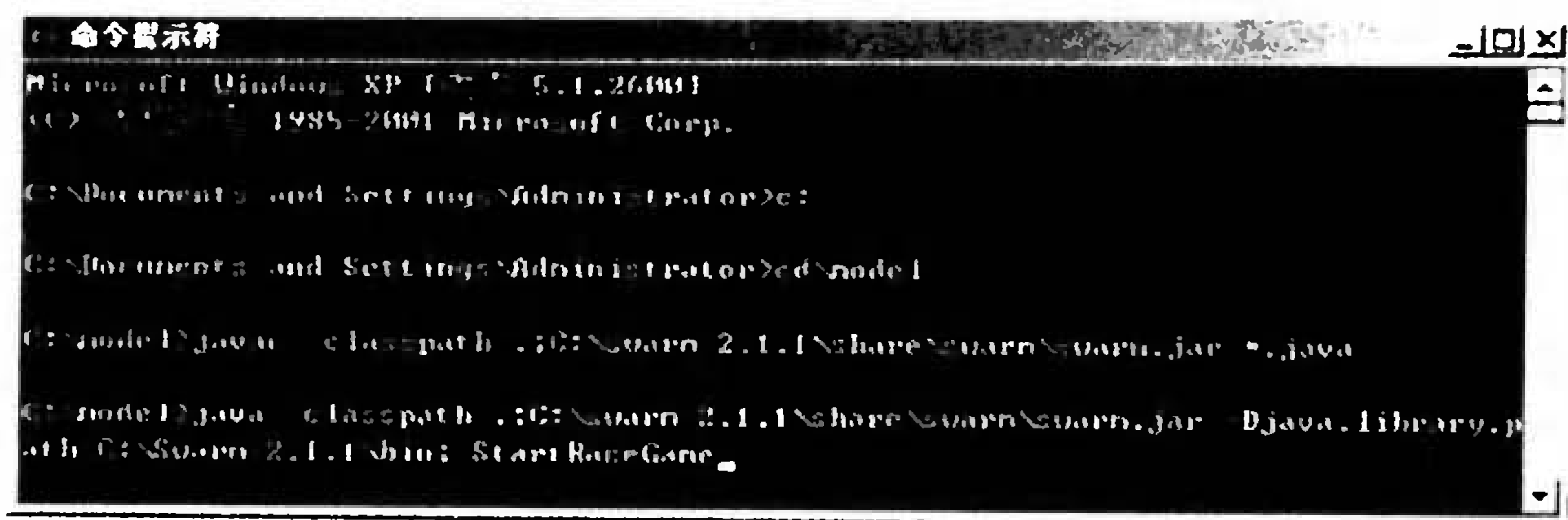


图 4—19

(五) 在集成开发环境 (IDE) 中使用 Swarm

Swarm 支持 SUN JDK 1.2 或以上版本。因此,常用的 IDE 如 Jbuilder, Visual Café, Eclipse 等都可以用来编写和调试基于 Java 的 Swarm 程序。我们以 Eclipse 3.0 为例,在假设用户已经建立了一个工作空间 (Workspace) 和工程 (Project) Swarm_test 的情况下,介绍与 Swarm 有关的配置方法。关于 Eclipse 安装与使用的一般操作,请参考相关书籍和网上资源。

首先,在工程中建立描述模型的程序文件 (*.java),或者导入 (Import) 现有的模型。此时程序中对 Swarm 类库的引用并没有在开发环境中体现,运行编译时会出现 “XXX cannot be resolved” 的错误信息。

选择当前的工程 Swarm_test,在工程 (Project) 菜单选择特性 (Properties),出现 Swarm_test 特性 (Properties for Swarm_test) 对话框,如图 4—20 所示。

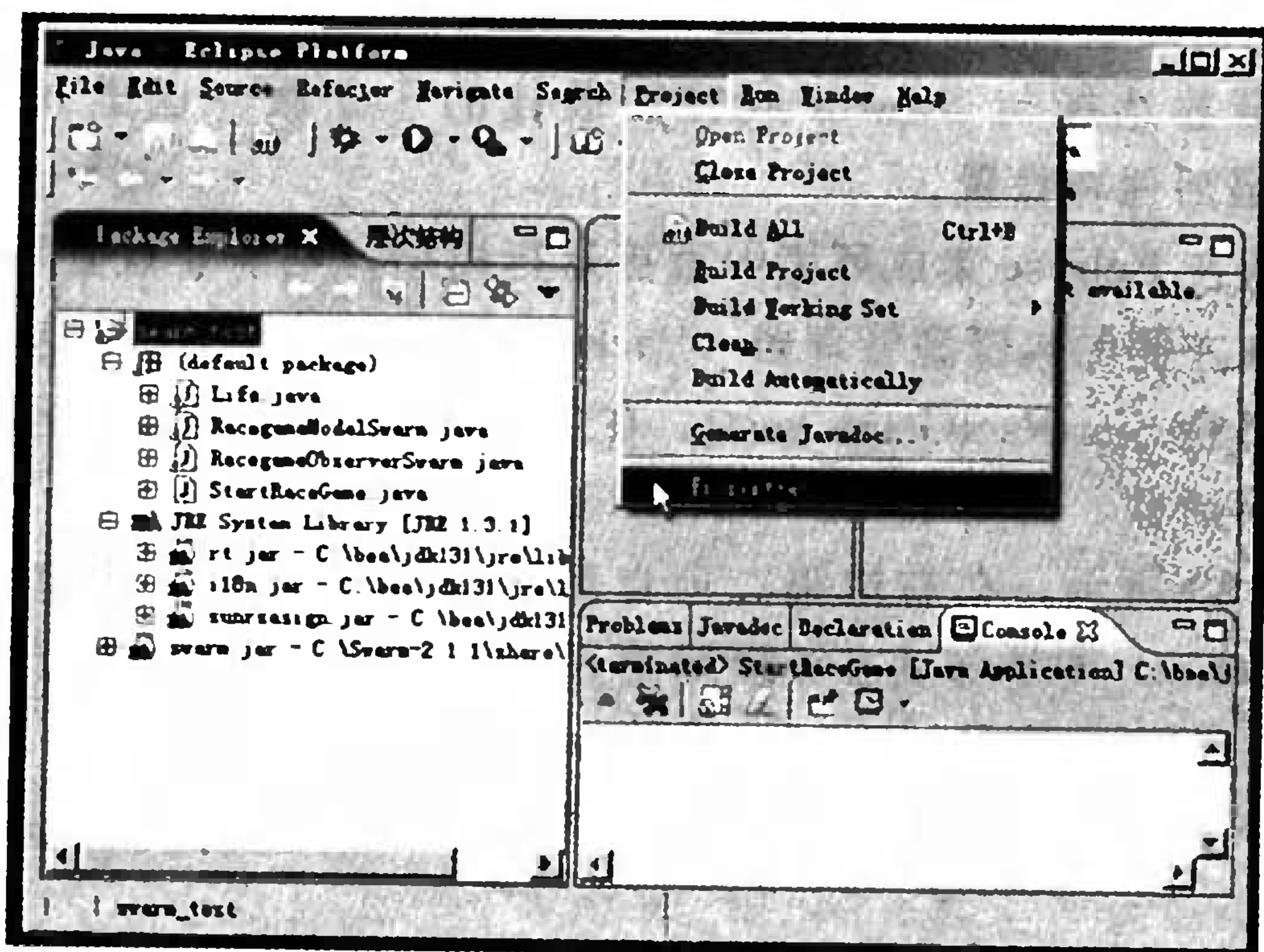


图 4—20

在左边选择设置 Java 构建路径 (Java Build Path), 右边选择库 (Libraries), 用添加外部 JARs (Add External JARs) 按钮把 Swarm.jar 添加到工程中, 按前面所述的默认安装方法, 此文件应该在 C:\Swarm-2.1.1\Share\Swarm\ 目录中, 如图 4—21 所示。

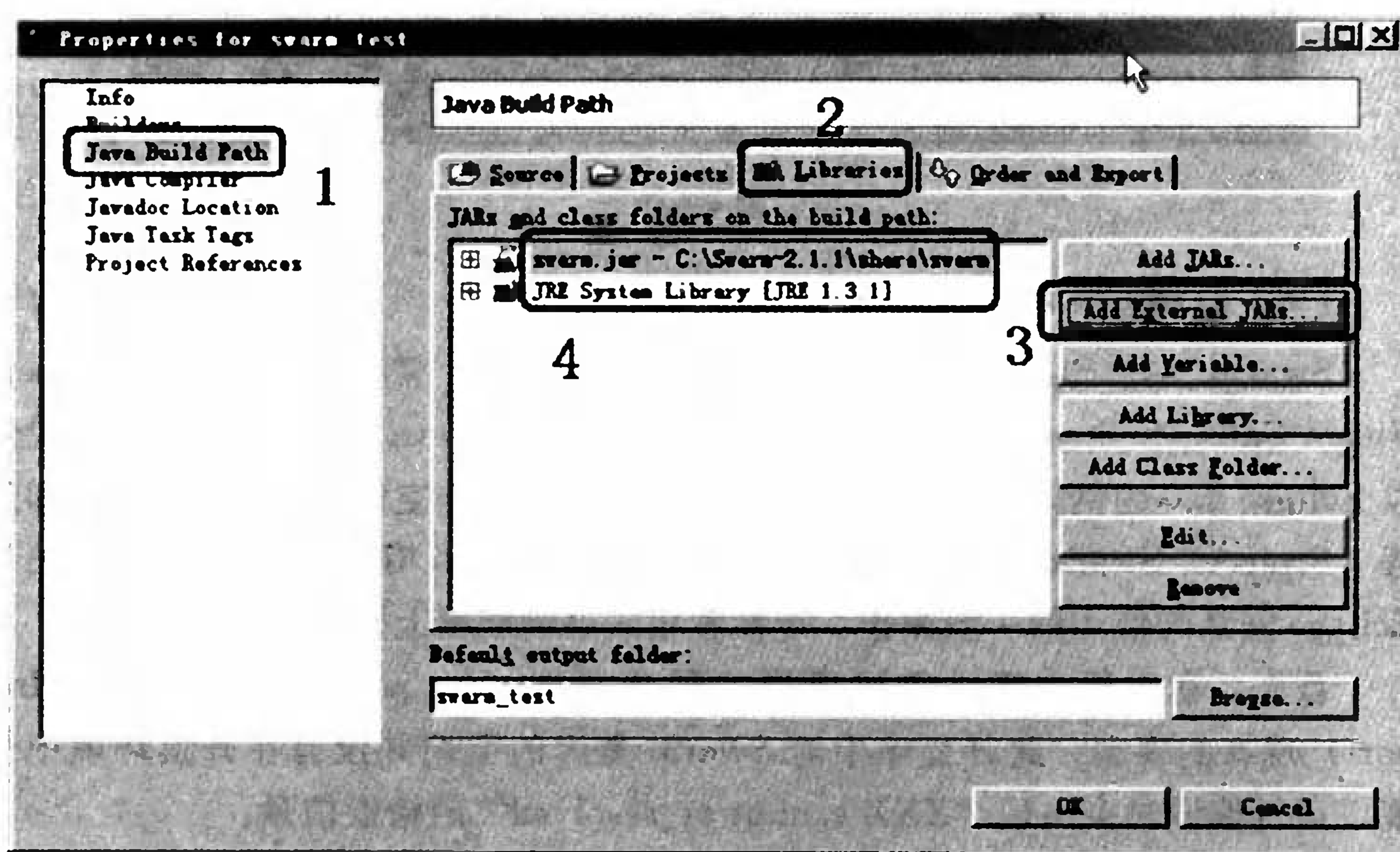


图 4—21

如果希望更改缺省 Java 运行库, 可以点击 JRE 库 (JRE System Library) 按钮选择, 推荐选择与 Swarm 兼容性最佳的 1.2 版 (这里我们选择的是 1.3.1 版)。最后保存设置。

如果希望在 Eclipse 集成环境中直接运行模型, 则需要设置所需的动态链接库路径。在左侧的包资源管理器 (Package Explorer) 中选中包含 main 方法的主类 (这里是 StartRaceGame.java), 在运行 (Run) 菜单选择运行 (Run...) 打开运行配置对话框, 如图 4—22 所示。

如图 4—23 所示, 在右边第二项自变量 (Arguments) 中的 VM 自变量 (VM Arguments) 中添加动态链接库路径。按前面所述的默认安装方法, 这里需要添加的内容应该是 “-Djava.library.path=C:\Swarm-2.1.1bin;”。这样, 点击最下面的运行 (Run) 按钮, 模型就可以正常地运行了。

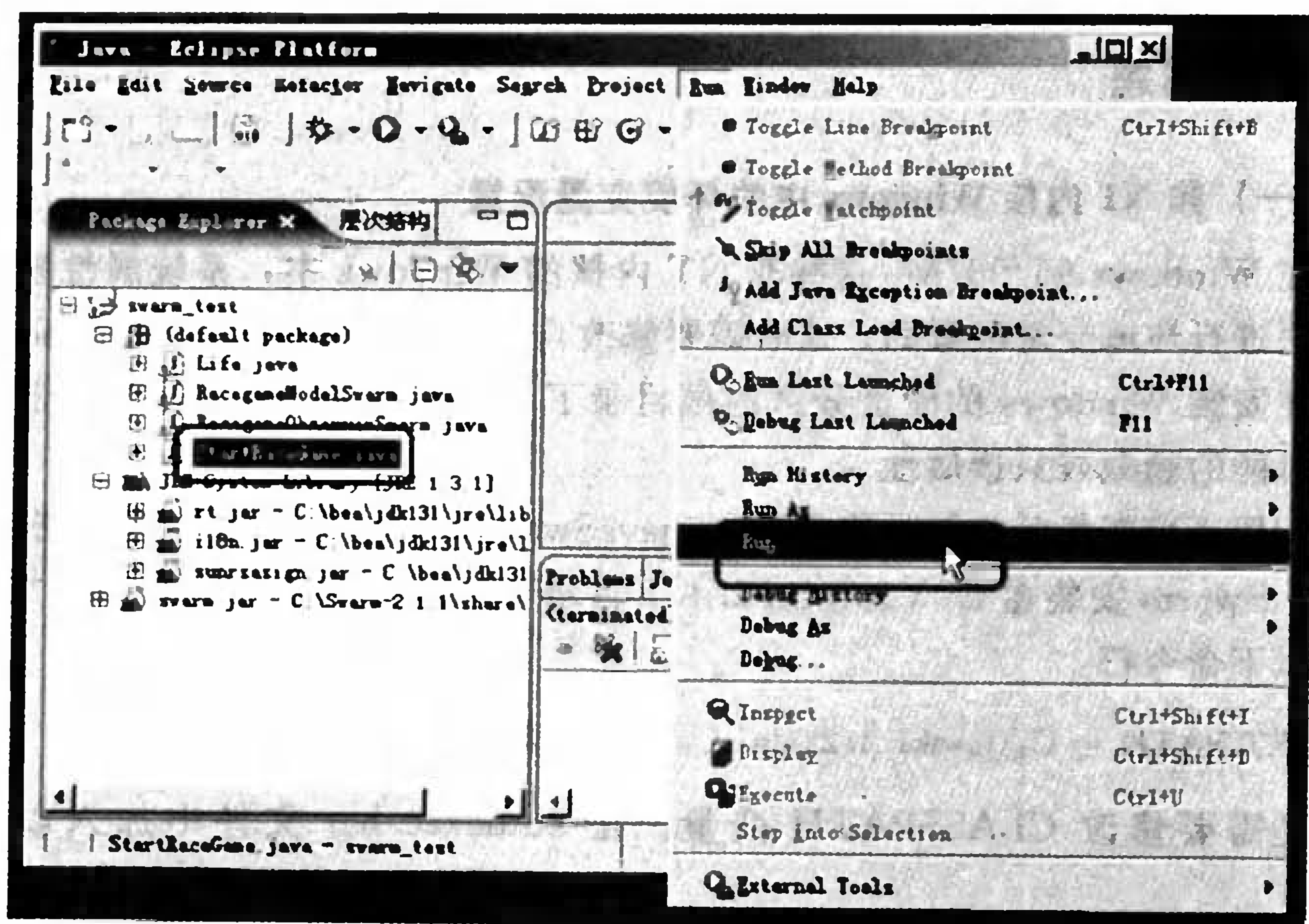


图 4—22

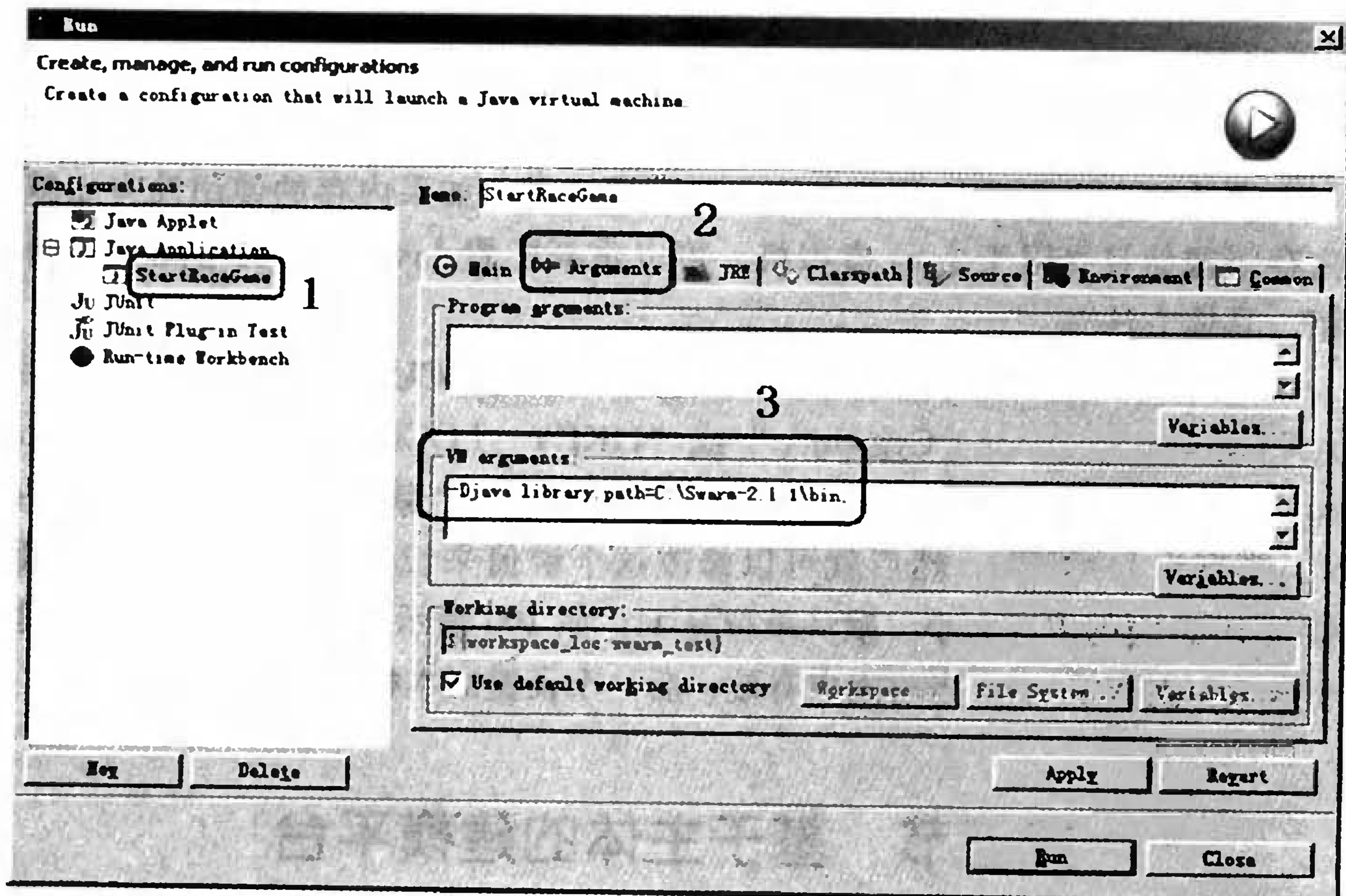


图 4—23

三、常见问题

(一) 非 NT 内核 Windows 中的环境变量配置

在 Windows 95/98/Me 这些非 NT 内核的 Windows 中，系统属性窗口中是无法进行环境变量配置的，这时需要修改自动批处理文件 autoexec. bat，此文件在安装 Windows 的硬盘分区的根目录下（通常是 C:\），修改之前应该去掉可能的隐藏或只读属性。

配置环境变量其实就是将 JDK 和 javaSwarm. dll 放到系统的查找路径下。这里，Swarm 安装在 C:\Swarm-2.1.1 目录下，那么在 autoexec. bat 文件中加入以下命令行：

```
SET PATH = C:\j2sdk1.4.2\bin; C:\Swarm-2.1.1\bin; %PATH%
```

还需要修改 CLASSPATH 变量。在 autoexec. bat 文件中加入以下命令行：

```
SET CLASSPATH = C:\Swarm-2.1.1\share\Swarm\Swarm.jar; %CLASSPATH%
```

以上工作结束后，重新启动 Windows，就可以编译运行 java 写成的 Swarm 程序了。

(二) 修改虚拟机的内存配额

在设计一个主体数量非常多的大规模模型时，如果内存的使用没有超越机器内存限制而只受限于 Java 虚拟机，可以重新配置 Java 虚拟机增加它的内存配额。具体方法是：

在 Windows 注册表中的下面查找主键 “HKEY_CURRENT_USER \ Software \ Cygnus Solutions \ Cygwin \” 或 “HKEY_LOCAL_MACHINE \ Software \ Cygnus Solutions \ Cygwin \”，在下面创建一个新键 “heap_chunk_in_mb”，类型为 DWORD，然后就可以修改这个键值来设置 Cygwin 的内存配额。数值是 16 进制的内存大小，默认单位是 M，如 100 表示 256M。前面两个主键第一个修改只对 Windows 当前用户有效；后一个设置对本机所有用户有效。

第五节 基于主体的建模平台

随着计算机软件技术的不断进步，近 10 年来，一种又一种基于主体的建

模方法的应用平台逐渐被开发出来，它们的功能越来越完善，使用也越来越方便。目前，在复杂系统研究中，除 Swarm 外使用较多的主要是以下 5 种平台，本节我们将依次介绍，并对它们进行各个方面的比较。

一、基于主体的其他建模平台

(一) StarLogo

StarLogo 是 MIT 的 Media Laboratory 和 Teacher Education Program 在 1989—1990 年开发的一个可以编程的建模环境。StarLogo 属于早期研发的基于主体的建模程序，由于功能简单，还算不上是一个完整的建模平台，但是 StarLogo 很好地体现了这种新的建模思想，而且易于学习，适合于初学者使用。

StarLogo 中有两类实体：海龟 (turtle) 和点 (patch)。其中，海龟是我们自己创建的主体，点是画布 (canvas) 上固定的一个个小方格。我们可以对海龟和点的行为及属性进行编程，海龟和点的主要固有属性是颜色和坐标，我们还可以给它们自定义一些新的属性，程序运行时所有的海龟和点都以系统规定的时间步进并行运转。StarLogo 就是通过海龟和点的交互运作来模拟现实世界的运转的。另外，StarLogo 允许对海龟进行分类，这种类别叫做“种子”，例如，我们可以创建两类海龟：狼和兔子，然后对这两类种子分别定义它们的属性和行为。

StarLogo 可以运行于 Windows PC、Mac 和 Unix 等多种操作系统。

网上资源：<http://education.mit.edu/StarLogo/>

(二) NetLogo

NetLogo 是由美国西北大学的 CCI (Center for Connected Learning) 和 Computer-Based Modeling 研制推出的，是一个最近发展非常快的建模平台，从 2002 年 5 月第 1 版问世到 2004 年 8 月，先后推出了多个版本，最新版本是 2004 年 8 月 6 日推出的 2.0.2 版。

NetLogo 可以说是 StarLogo 的后代产品，它继承了 StarLogo 语法简单等许多优点，并经历了 MacStarLogo、StarLogoT，增加了许多重要的新的特征和语言支持、接口，功能比 StarLogo 要完善很多。其模拟库包括生物、医学、物理、化学、数学、计算机科学和经济、社会心理各个领域，也比 StarLogo 要丰富许多。它是用来模拟自然和社会现象的计算机程序建模环境，尤其适合于随时间变化的复杂系统的建模。系统能够给成百上千个独立的主体发布命令并实时操纵它们，这使得研究小的个体行为和大的许多个体表现出来的共性之间的联系成为可能。

虽然 NetLogo 推出才两年,但其发展可谓朝气蓬勃,几乎每隔几个月就有一个新的版本,每个新的版本都有很多非常适用的功能。最新的版本加入了 HubNet 的最新技术,从而使得 NetLogo 不仅可用于复杂系统的科学研究,而且实现了新的网络功能,可以供老师和学生在课堂的网络教学环境中使用。

NetLogo 用 java 语言写成,能够运行在 Mac, Windows, Linux 等多种平台,单个的模型还可以用 Java Applets 的形式在 Web Browser 中运行。

网上资源: <http://ccl.sesp.northwestern.edu/NetLogo/download.shtml>

(三) RePast

RePast (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) 是由芝加哥大学的社会科学计算研究中心开发研制的一个基于主体的计算机模拟软件架构。它是一种在 Java 语言环境下用以设计生成基于主体的模拟模型的软件架构,提供了一系列用以生成、运行、显示和从一个基于主体的模拟平台收集数据的类库。此外,RePast 还能够对运行中的模型进行“快照”以及生成模型运行的影像资料。RePast 从 Swarm 模拟工具集中借鉴了不少的设计结构和方法,所以也可以说,它是一个“类 Swarm”的模拟软件架构。

在 RePast 中建立一个像状态机的模拟模型,这种核心状态由它所有成员的集体性的状态属性组成。这些成员可以被划分为底层结构和表层结构。底层结构是产生于那些运行模拟软件、显示和收集数据等架构的各种各样的机制。而表层结构是那些模拟模型设计者创立的模拟模型。底层结构的状态就是以后的模型所显示的状态、数据收集对象的状态等等。表层结构的状态是那些被建立模型的状态。

RePast 用 Java 语言写成,可以在 Windows 和 Unix 操作系统上运行。

网上资源: <http://prdownloads.sourceforge.net/RePast/>

(四) Ascape

Ascape 是布鲁金斯研究所 (The Brookings Institution) 开发的基于主体建模平台,用来设计、分析和分类基于主体的模型。Ascape 有很强的表达功能,可以用一种方式表达同样的基础建模思想,且高度抽象、简单适用、功能健全,并且可以在任何环境下开发。它完全用 Java 编写的,从而可以提供最大的可配置选择,并且可利用 Java 中强大的类型定义和习语。开发 Ascape 主要是为了支持社会经济系统的模型,这些有代表性的模型根据复杂网络(比如网状格、随机图表以及软件包)中行为互相影响的规则来比较一些主体。

Ascape 除了有基本的对模型运行的控制外(如开始、暂停、停止等等),

还可以改变模型的设置,显示关于这个模型的信息,创建新的图表,给正在运行的模型的拍摄电影,以及打开其他 Ascape 模型包括该模型的内置类库。并且它的结果显示功能非常强大,能显示光栅图、柱状图、曲线图,还有关联的二维视图、一维滚动视图和单一视图,并且在 Ascape 中使用者还可以在运行模型时通过选择不同的制图特征定制自己的视图。

Ascape 全部由 Java 语言实现,可在 Windows、Macintosh、Unix、Linux 及网络环境下使用,因有选择性地使用了 Java 1.2 API,故其网络应用可以在任何浏览器中使用。

网上资源: <http://www.brook.edu/es/dynamics/models/ascape/README.html>

(五) TNG Lab

TNG Lab (Trade Network Game Lab) 是美国爱荷华州立大学的 McFadzean, Stewart 和 Tesfatsion 开发的一个特殊的可计算实验室,是为了研究在一个多样化的市场环境下的商业网络构成而设计的,是一个针对性很强的对基于主体的模型进行模拟研究的工具。

TNG Lab 尤其应用在经济领域,可供研究以劳动力市场为代表的一些不同的市场类型(如两方市场、中介市场等)中的一些重要的经济学结果和指标,如市场支配力、劳动生产率、失业率、福利水平以及主体行为等等。TNG Lab 中包括买家、卖家和经销商,他们重复地选择更合适的商业伙伴,参与到无合作博弈的有风险的交易中,并随时间推移进化他们的商业策略。它有标准的组件,可扩展,操作简单,适合进行经济研究和教学。

TNG Lab 由四层结构组成,底层是 SimBioSys 类结构,第二层是 TNG/SimBioSys,第三层是 TNG/COM,最上层是 TNG Lab,这样的封装结构就构成了 TNG Lab。

TNG 体系主要用 C++ 实现,只能在 Windows 平台上运行,尚不能在 Unix 等平台上运行。

网上资源: <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/tlab00b.readme.htm>

二、模拟平台的比较

在对本章介绍的软件框架进行了多次试验运行,并做了反复的比较分析后,我们发现,由于都是基于主体的模拟软件平台,它们在设计、功能、表现等很多方面都有一定的共性。与此同时,这 6 种模拟平台虽然都很好体现了

基于主体的建模思想，它们之间在某些方面还是有一定区别的。

(一) 共性

1. 设计概念上的相似

六种建模平台都将主体建模的关键概念抽象化、一般化，以便设计出一组轻便的工具包集，这些工具包都尽最大可能地去满足以下条件：易于使用和构造模型、富有表现力、能够得到最佳的运行性能、可随处配置，同时具备鲁棒性、快速高效等一般软件工具包的特点。

2. 使用流程上相似

六种建模平台在使用流程上有较大的共性，在使用上大都按照下述流程进行：

(1) 创建一个模拟世界，包括空间、时间和可以定位的对象（即可以找到它处于整个世界时空结构中的某一点）。各对象的内部状态也组成了整个世界的状态。

(2) 定义好各种对象即主体的行动规则，允许这些主体根据他们自己的规则和内部状态来决定他们自己的行为。

(3) 建立一些对象用于观察、记录和分析由第一阶段建立的对象所产生的数据。

(4) 运行这个模拟世界，使模拟和观察对象都按照明确定义的同步模型规定的时间发展运动。

(5) 观察这个模拟世界运行中的各种观察数据，查看各种统计图表，得出或者验证一些结论。

3. 易用性和简单操作性的相似

六种建模平台设计的最初都强调不要求使用者有很强的编程基础，都力图使建模者从繁重的编程中解脱出来。同时，这六种平台使用起来流程都十分清晰，只要对基于主体的建模思想有充分的理解，操作起来都比较简单。

4. 可扩展性的相似

六种平台在设计思想上也都特别考虑到了平台的可扩展性，以便该种平台将来在技术上和功能上的改进和扩充。六种平台中多数用 Java 语言写成，Java 语言本身就提供了很好的可扩展性。同时，六种平台提供的类库均有清晰的结构，十分易于扩展。

5. 抽象性的相似

六种平台中多数平台都将主体建模抽象成一些常用的抽象类库，如主体结构、主体行为规则、运行时间表、表现工具、存储形式等具体的工具包。这种抽象性让后来的研究者可以十分方便地在此基础上集合多种语言和工具继续建

模,从而借鉴前人的研究成果。

6. 操作界面相似

六种平台的操作界面类似并都非常注重界面的友好性以及和使用者的交互性。

如在工具条设计上大都有 start、pause、save 和 quit 等功能相似的工具条,可以十分方便使用者对模型运行的实时控制。在返回结果的界面上,均有多种表现形式,给使用者提供了各种观察图形,如时间序列、柱状图、饼状图。使用者通过这些图形,可以随时方便地从自己喜欢的角度去观察模型的运行变化。

(二) 区别

1. 设计目标的区别

StarLogo 是用基于主体的建模方法来研究分散系统的运行机制。所谓分散系统是指:没有组织者而组织,没有协调者而协调的系统。使用 StarLogo,你可以对许多现实世界中的现象进行建模并且观察研究,例如鸟群、交通、蚂蚁以及市场经济。

NetLogo 的设计是因为修改和扩展语言的需要,它是在继承 StarLogo、StarLogoT 的一些重要思想的基础上来实现更强大的功能、更方便的操作和更好的接口的一个模拟自然和社会现象的计算机程序建模环境,尤其适合于随时间变化的复杂系统的建模。NetLogo 非常强调模拟平台的功能。

Swarm 的设计目标向研究人员提供了一套标准、灵活、可靠的软件工具集,从而提供一个设备精良的软件实验室,可以用来对复杂适应系统进行研究。Swarm 的基本目标是将研究人员从构造大规模计算机模拟所产生的大量软件工程方面的负担中解脱出来。为达到这个目标,Swarm 提供了一整套工具,和一个驱动模拟的内核。研究人员可以自由地定制 Swarm 中的多种对象,在感兴趣的领域内对系统建模。

RePast 的设计目标起初是因为芝加哥大学的研究学者希望有一个更方便的模拟软件来满足他们一个较短的学习周期的需求,故 RePast 非常强调可扩展性以及动力性,最初的设想只是避开 Swarm 中 Objective-C 的复杂性,提供一系列能够一起工作的并且能够简化 Swarm 模拟架构的 Java 类库。但这种将 RePast 作为 Swarm 的扩展工具集的想法很快就被摒弃了,RePast 这一软件架构的可生存发展性及其实用性得到了芝加哥大学的研究学者的认同,并由初期的简单结构发展到了今天这样的规模。

Ascape 的设计目标则是用尽可能简洁的描述来定义一个完整的模型,并

使其具有高度概括性，能够通过某种方式描述基础的建模思想，并且可以在其他的环境和构架中进行检测。同时它可以为用户提供导向型工具（oriented tools），使其不需要编写代码就能够实现模型交互，也提供了一个能对各种复杂系统进行建模的环境。Ascape 还希望具有高度的抽象性，尽可能封装所有需要的建模思想和建模方法。这样，Ascape 只要用非常少的语句就可以完成对一个模型的模拟。例如，在模拟热虫模型中，Swarm 所需代码约 990 条；RePast 所需代码为 600 条，而 Ascape 仅需代码 390 条就可以实现，其他的数据也说明了 Ascape 在实现相同功能的基础上编程量是最少的。

TNG Lab 是为研究在一个多样化市场环境下商业网络构成而设计的一个特殊的可计算实验室。它针对性很强，尤其适合于应用在经济领域，可供研究以劳动力市场为代表的一些不同的市场类型（如两方市场、中介市场等）中的一些重要的经济学结果和指标，TNG Lab 希望包含构造一个世界的成员函数和数据，存在于世界中的一类或更多的主体，以及设计工具和用户界面的控制，从而可以对经济领域的复杂系统方便地建模。

2. 内部建模机制的区别

StarLogo 是一种特殊的 Logo 编程语言，因此和传统的 Logo 语言一样，Star Logo 可以通过向计算机屏幕中的海龟发命令来作图。在 StarLogo 中，每个海龟就是一个独立的主体，其他海龟以及屏幕中的画布就是海龟所处的环境。StarLogo 容许我们并行地同时控制上千个海龟，并且为这些海龟设定不同的行为模式。

NetLogo 继承了 StarLogo 建模思想的核心，但 NetLogo 有更清晰的操作界面，有更强大而灵活的测绘系统可以显示海龟形状和大小并记录准确的海龟位置，还有强大的数据输入输出功能，系统能够非常准确及时地给成百上千的独立主体发布命令并实时操纵它们，这使得研究小个体行为和许多大个体表现出来的共性之间的联系成为可能。

Swarm 建模实际是一种自上而下的构建方法，它模拟的是简单的单位，通过局部的控制，让行为从底层涌现。因此，有学者把 Swarm 的建模思想概括为“一系列独立的个体通过独立的事件进行交互”。Swarm 实际是一些对象的集合，Swarm 建模可以把这些对象作为基本建筑砖块来构建他自己的程序。用 Swarm 模拟的起点是主体的集合。每个主体（类）是很多个体（实例）的原型，由此形成 Swarm 模拟的世界并观察其发展变化。

RePast 作为一个“类 Swarm”的模拟软件架构，其主要特点是底层结构的抽象性、可扩展性和良好的表现能力。因此 RePast 的建模思想实际是一些常见的概念：建立一个像状态机的模拟模型，这种核心状态由它所有成员的集

体性的状态属性组成。这些成员可以被划分为底层结构和表层结构。底层结构是各种各样的产生于那些运行模拟软件、显示和收集数据等架构的机制，而表层结构是那些模拟模型设计者创立的模拟模型。

Ascape 建模关键在于使用 Ascape 中的 Scapes。Scapes 本质上是功能强大的主体的集合，他们不仅知道他们所包含的内容，并且知道怎样遍历所包含的内容，知道所含拓扑结构的细节，适当的表示方法等。更重要的是，Scapes 本身就是最好的主体。

TNG Lab 建模的关键是弄清楚其内部的这 4 层结构，底层的 SimBioSys 类结构，第 1 层的 TNG/SimBioSys，第 3 层的 TNG/COM，最上层的 TNG Lab。TNG Lab 中的模拟程序都是基于 SimBioSys 类的，而这个类是由抽象的基类 bioSimulation 继承而来的。它包含了构造一个世界的成员函数和数据，存在于世界中的一类或更多的主体，以及设计工具和用户界面的控制。

3. 适用人群的区别

StarLogo 和 NetLogo 均继承了 Logo 语言的优点，语法十分简单，并都很好地体现了基于主体的思想，使用起来也非常方便，因此，这两种平台非常适合编程基础不是很强的初学者使用。而且 NetLogo 的模型库和功能还非常强大，并且由于使用了 HubNet 体系，在基于网络模拟方面有了最新的技术进步，支持在网络设备环境中提供模拟共享，故还适用于网络课堂上的模拟教学和科学研究。

Swarm 和 RePast 应用广泛，它们的模型库十分完整，可以适用社会生活中的各种复杂系统，但是它们主要的应用语言都是 Java，虽然这里对 Java 的使用还不算复杂，但总的说来学习和使用 Java 语言均要求有一定的编程基础，因此这两种平台比较适合于有一定计算机编程基础的使用。

Ascape 的应用语言也是 Java，但相比 Swarm 和 RePast 而言，它有着更强的表达能力。Ascape 的高度抽象使得其不仅功能健全，而且简单适用，因此对于使用者的编程要求要比 Swarm 和 RePast 低一些，使用者只需使用非常少的语句就可以完成对一个复杂系统模型的模拟，此外，Ascape 特别适用于使用者对社会系统和经济系统的建模。

TNG Lab 对于使用者来说，与上述几种建模平台最明显的区别是它只能运行于 Windows 平台，应用语言为 C++，同时它的针对性很强，是一个专门为研究多样化的市场环境下的商业网络构成而设计的一个特殊的可计算实验室，因此尤其适用于经济领域的复杂系统建模者使用。

4. 使用平台区别

StarLogo 和 NetLogo 可以运行于 Windows、Mac 和 Unix 等多种操作

系统。

Swarm 和 RePast 可以在不同版本的 Unix 和 Windows 环境下运行。

Ascape 可以在 Windows、Mac、Unix、Linux 等多种平台下运行。

TNG 则只能在 Windows 平台上运行。

此外, Ascape 还可以在网络环境下使用, 而 NetLogo 不仅支持在网络设备环境中提供模拟共享, 而且其单个的模型还可以用 Java Applets 的形式在 Web Browser 中运行。

三、总结

通过对这 6 个模拟平台的比较研究, 我们可以将它们的共性和区别简单地汇总到表 4—1 中。

表 4—1

6 个模拟平台的比较

平台名称	共性	开发机构	运行平台	编程基础 要求	适用人群	应用领域
StarLogo	• 均有高度的抽象性 • 均有很好的扩展性 • 均不要求使用者有很高的编程基础 • 操作均较为简单、易用 • 均很好地体现了基于主体的建模思想	MIT	Windows、Mac 和 Unix 等	最低	初学者	模型相对比较简单
NetLogo		美国西北大学	Windows、Mac 和 Unix 等	较低	科研和教学	各个领域, 其模拟库涉及的各个方面
Swarm		圣菲研究所 (SFI)	Unix 和 Windows	最高, 代码量较大	科研	应用广泛, 可用于生物学、政治学、经济学、人类学、化学和生态学等领域
RePast		芝加哥大学	Unix 和 Windows	相对较高, 代码量较大	科研	应用广泛, 尤其是涉及人文、社会的经济、社会模型
Ascape		布鲁金斯研究所	Windows、Mac、Unix 等多种平台和网络环境	一般, 代码量不大	科研	社会系统和经济系统
TNG Lab		美国爱荷华州立大学	Windows	一般, 代码量不大	科研和统计	经济、贸易系统

随着计算机模拟技术的不断进步, 基于主体的模拟平台也会不断地继续发展, 在对这些模拟平台的比较研究和实际操作中, 我们认为基于主体的模拟平台会朝以下几方面方向发展。

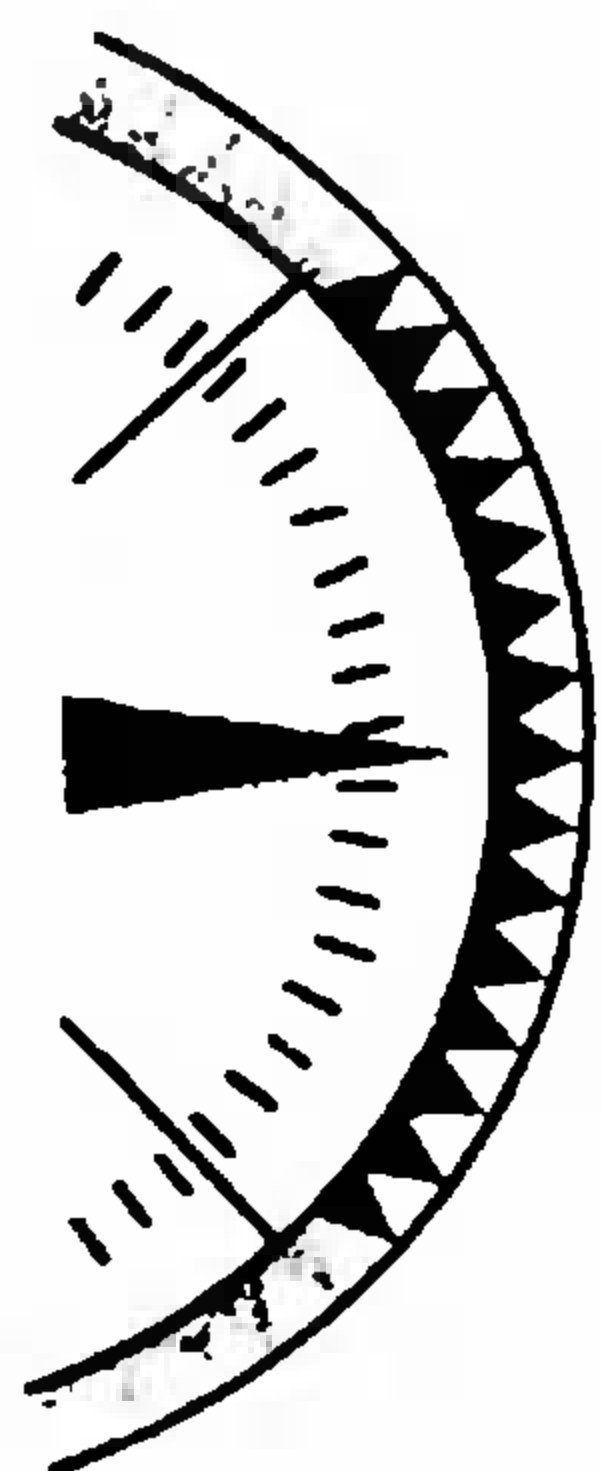
(1) 分布式模拟, 即将来的模拟平台将朝着支持分布式网络模拟的方向发展。在上述 6 种平台中, NetLogo 的最新版本已经在这方面有了一定的突破, 笔者相信, 其他平台也会在这方面予以改进, 易于使用的分布式模拟的类库会逐渐出现在各种模拟平台中, 这样我们将来的模拟平台在加入分布式模拟技术之后, 无论是从功能上还是技术上都会有很大的改进。

(2) 模拟平台对使用者编程基础的要求将越来越低。目前主流模拟平台中的 Swarm 和 RePast 等均要求使用者有一定的编程基础。笔者相信, 将来的建模平台肯定能让我们只要用非常少的语句就可以完成对一个模型的模拟, 这可以通过尽可能封装所有所需建模思想和建模方法以及增加同用户的交互性来实现。

(3) 基于网络 (Web-based) 的模拟会逐渐在各个模拟平台中体现。随着网络通信技术的发展, 将已经建好的模型以一定的数据结构在 Web 上发布, 并提供相应的模拟功能。与此同时, 各种模拟平台、模拟软件框架之间相互通讯的问题也将解决, 形成一种统一的基于主体的建模软件框架模型, 这种形式的建模肯定会被越来越多的复杂系统研究者所接受。因此, XML、JSP 等各种计算机新技术也逐渐会加入到模拟平台中。

(4) 模拟平台对数据库技术的依赖会越来越高。大型的模拟必然需要也将产生大量的数据, 这些数据的存储和分析就必须得到数据库的支持。虽然现在的模拟框架, 例如 Swarm、NetLogo 都提供了一定的数据处理功能, 但主流数据库的数据存储和处理功能肯定是不可替代的。

(5) 在表达能力上, 3D 表现技术将会逐渐引入各个模拟平台。目前的模拟平台有光栅图、柱状图、曲线图等表达方式, 引入 3D 技术后, 模拟平台的表达能力将大大加强。



第五章

系统科学的应用

内容提要

系统科学研究不仅涉及非生命系统，同时涉及生物界、人类社会和思维领域；它所研究的信息传输规律、系统演化规律、控制反馈规律等是自然界、人类社会和思维领域都存在的共同规律。本章首先介绍系统科学研究的一般方法：系统建模、系统仿真、计算机建模和仿真的一般步骤以及研究系统科学的成功要素，然后给出了 10 个各种不同系统的建模案例，供读者参考。

第一节 系统科学研究的一般方法

系统科学是介于自然科学和哲学之间的交叉学科。它的基本概念如信息、系统、结构、功能、控制、反馈等，不仅适用于非生命系统也适用于生物界，不仅适用于自然系统也适用于人类社会和思维领域；它所研究的信息传输规律、系统演化规律、控制反馈规律等，是自然界、人类社会和思维领域都存在的共同规律。系统科学的基本概念和规律都从某一个侧面揭示了客观世界普遍联系的特定形式，具有科学方法论的意义。因此，系统科学的诞生再现了世界的科学图景，改进了人们的科学思维方式，为认识世界和改造世界提供了崭新的科学方法。

系统科学研究方法，就是根据事物本身的特点，把对象放在系统的形式中加以考察和研究的方法，也就是要从系统的观点出发，着眼于整体和部分、整体和环境的相互联系和相互作用，通过综合的、辩证的、精确的分析和研究，求得认识和把握事物的规律。研究复杂系统应当是在唯物辩证法指导下进行的，它包括以下 5 个方面的结合。

(1) 定性判断和定量计算的结合。通过定性判断，建立系统总体及各子系统的概念模型，并尽可能将他们转化为数学模型或计算机模型，经求解或模拟后得出定量的结论，再对这些结论进行定性归纳，以取得认识上的飞跃，形成解决问题的建议。

(2) 微观分析与宏观综合相结合。微观分析的目的是为了了解系统的层次结构，而宏观综合的目的则是了解系统的功能结构及其形成过程。简单系统的元素同系统整体在尺度上的差别还构不成微观与宏观的差别，但巨系统出现了微观与宏观的划分，元素或基本子系统属于微观层次，系统整体属于宏观层次。任何系统，如果存在某种从微观描述过渡到宏观整体描述的方法，就标志着建立了该系统的理论基础。

(3) 还原论与整体论相结合。还原论强调从局部机制和微观结构中寻求对宏观现象的说明。而整体论则强调系统内部各部分之间的相互联系和作用决定着系统的宏观性质，整体性原则是系统方法的首要原则。但如果没有对局部机制和微观结构的深刻了解，对系统整体的把握也难以具体化。

(4) 确定性描述与不确定性描述相结合。自牛顿以来，科学逐步发展了两种并行的描述框架。一种是以牛顿力学为代表的确定论描述，另一种是由统计学和量子力学发展起来的概率论描述。在系统理论的早期发展中，两种方法都有大量的应用，但从总体上看，要么只使用确定论描述，要么只使用概率论描述，没有把两者沟通起来。现代系统科学的总体发展越来越要求把两种描述框架沟通起来，形成统一的新框架。

(5) 科学推理与哲学思辨相结合。科学理论是具有某种逻辑结构并经过一定实验检验的概念系统，科学家在表述科学理论时总是力求达到符号化和形式化，使之成为严密的公理化体系。但是科学的发展往往证明任何理论都不是天衣无缝的，总有一些“反常”的现象和事件出现。这时就必须运用哲学思辨的力量，从个别和一般、必然性和偶然性等范畴，以及对立统一、否定之否定等规律来加以解释。

系统科学方法为人们提供了新的思想模式，是推动科技整体化、综合化的重要方法。系统科学方法兼具多种认识功能，是研究复杂系统的有效工具。系

统科学方法为人们提供了制定系统最佳方案以实行优化组合和优化管理的手段。

一、系统建模

要对复杂系统进行有效的分析研究并得到有说服力的结果,就必须首先建立模型。系统模型是一个系统某一方面本质属性的描述,它以某种确定的形式(例如文字、符号、图表等)提供关于该系统的知识。系统模型一般不是系统对象本身,而是原系统的描述、模仿或抽象。对于大多数研究目的而言,没有必要考虑系统的全部属性。因此,系统模型只是系统某一方面本质属性的描述,本质属性的选取完全取决于所要研究的目的,所以,对于同一个系统来说,由于研究目的不同,可以建立不同的系统模型。因此,系统模型的建立既是一种技术,又是一种“艺术”。

系统模型反映实际系统的主要特征,但它又高于实际系统而具有同类问题的共性。因此,一个适用的系统模型应该具有如下3个特征:

- 它是现实系统的抽象或模仿;
- 它由反映系统本质或特征的主要因素构成;
- 它集中体现了这些因素之间的关系。

系统模型按与时间的依赖关系分为静态模型和动态模型,按是否描述系统内部特性分为“黑箱”模型和“白箱”模型,按变量形式分为确定性、随机性、连续型、离散型,按变量之间的关系分为代数方程、微分(差分、迭代)方程、统计型、逻辑型。针对不同的对象系统,可以采取不同的方法建造系统模型。常用的系统建模方法有以下4种。

推理法:对于系统内部结构和特性已经清楚的系统,即所谓的“白箱”系统,可以利用已知的定律和定理,经过一定的分析和推理,得到系统模型。

模拟法:对于那些内部结构和特性不很清楚的系统,即所谓的“灰箱”系统,则可以通过建立计算机仿真模型来模拟实际系统的行为,通过模拟的输入和输出结果来评价和确定系统模型。

辨识法:对于那些内部结构和特性不清楚的系统,即所谓的“黑箱”系统,若允许进行实验性观察,则可以通过实验方法测量其输入和输出,然后按照一定的辨识方法,建立系统模型。

统计分析方法:对于那些内部结构和特性不清楚,又不允许直接进行实验观察的系统,可以采用数据收集和统计分析的方法来建造系统模型。

在实际情况下,我们往往是综合运用上述几种方法对系统进行建模。系统

科学强调系统的演化过程，因此，系统模型是动态的。动力学系统理论给我们提供了描述动态行为和演化规律的模型，提供了系统分析的语言，它不但可以用于连续系统，如耗散结构理论，协同学中对自组织和系统演化的描述，而且可以用于离散系统，如元胞自动机、随机布尔网络、神经元网络和 L—系统中对自组织和系统演化的描述。因此，特别适用于描述复杂系统的整体性、稳定性、适应性和演化。

二、系统仿真

系统仿真是对实际系统的一种模仿活动，是对实际系统的一种抽象的、本质的描述。这种描述是与系统建模紧密联系在一起，包含系统对象、系统模型以及计算机工具等 3 个基本要素。系统仿真的确切概念是指通过建立和运行计算机仿真模型，来模仿实际系统的运行状态及其随时间变化的规律，以实现在计算机上进行实验的全过程。通过对仿真运行过程的观察和统计，得到被仿真系统的仿真输出参数和基本特性，以此来估计和推断实际系统的真实参数和性能。

用方程组等数学表达式定义的传统模型，求解和处理往往需要用复杂艰深的理论和技巧，费时费力，可行性常常较差，所得结果有时无法用实验检验。随着计算机性能的提高，计算机软件和系统中对人类知识的累积，计算机作为认知世界的利器的地位和作用越来越重要。特别是系统科学和复杂性科学兴起后，人们有了对于复杂系统动态建模的理论指导，以往因为系统的非线性特征而无法进行动态建模和仿真模拟的复杂系统，现在能在计算机中实现。用计算机程序定义的模型，可以做到既严格，又可行，使我们能够在计算机上研究和预测系统，通过计算实验来检验结果。好的模型可以做到有可重复性。对于那些无法用真实的实验来检验的复杂系统，计算机仿真和模拟是惟一可用的实验检验手段。

系统仿真作为系统研究和系统工程实践中的一个重要技术手段，在各种具体的应用领域中表现出越来越强的生命力。特别是在求解一些复杂系统问题中，系统仿真具有下列优点。

(1) 系统仿真面向实际过程和系统问题，将不确定性作为系统的随机变量来处理，建立系统的内部结构关系模型，从而使我们对复杂的、带有多种随机因素的系统，可以方便地通过计算机仿真实验求解，避免了求解复杂的数学模型的困难。

(2) 系统仿真采用面向对象的建模分析方法，通过人机界面，使建模仿真

直接面向分析人员，他们可以集中精力研究问题的内部因素及其相互关系，而不是计算机编程、调试及实现。

(3) 系统仿真为分析和决策人员提供了一种有效的实验环境，他们的设想和方案可以通过直接调整模型的参数或结构来实现，并通过模型的仿真运行得到其“实施”结果，从而可以从中选择满意的方案。

三、计算机建模和仿真的一般步骤

在建立模型的时候，我们应该从各种特性中抽象出它们的普遍特征。开发适用于所有复杂系统的模型时，这种抽象是至关重要的，但异常困难。因为特定的特征本身，就是一个令人迷惑的、多样性的问题；而要想获得一般性的认识，就必须抛开这些多样性的特征，对具体的特征进行过滤，从而建立一种更简单的模型，为研究所有的复杂系统提供指导。

计算机模型的方便在于能够随心所欲地设计、启动、终止和操纵。但这种灵活性也是产生困难的根源，人们不知道这种高度自由的模型是否反映问题的实质，是否真的有价值。因为，即便在很高程度上仿真某个特定系统的计算机模型，实际上也已经是对数据的一种抽象，而这种抽象很难保证都是正确的，换句话说，很难保证抽象过程中舍弃的不重要的具体细节特征真的不重要。当然，物理实验也一样，虽然直接操纵的是物理对象，但精心设计的物理实验，事实上都是经过认真考虑以后，抑制或除去了许多影响因素的简单抽象。然而，由于计算机模型在这方面走得更远，它不受制于任何实际的物理环境和条件，实验者可以随意安排任何怪异的或者偶然设立的计算规则。因此，要想使计算机模型真正有用，应该在设计安排规则时要更加谨慎和仔细，而不能没有节制地随心所欲。

即使是思维实验的模型，也必须注意依据数据以及从数据中引申出来的规律。设计者必须认真选择条件和环境的设置，如同做物理实验那样。但还要加一个限制条件，就是这种设置必须在物理上是可行的，这个问题在物理实验中会自然而然地被解决，但是对于计算机模型则必须通过设计者认真思考。模型的确是用于组织数据的，在这一点上它类似于布丰使用的表格。但是计算机模型所做的工作还不止这些，当模型运行起来，它就会准确地展示出设计的实现结果（就好像布丰的表格活动起来了），这就使计算机模型处在实验和理论之间：回头观察数据，我们就能够判断结果是否合理，往前观察理论，我们可以知道能否推导出一般规律。

在主体的适应过程中，由于背景和活动都在不停地变化，因此寻找一个杠

杆作用点或其他的复杂系统现象就很困难。甚至，在许多时候，我们难以确定某一特定行为的实际效应，因为一个特定主体的各种行为的效用，在很大程度上依赖于其他主体提供的、不断变化的背景。在拟态、共生和其他许多情况中，主体的“福利状况”往往主要依赖于其他主体的行为。在这些实际情形中，适应度（报酬，收益）的定义是隐含的。不论适应度如何定义都必须依赖于背景，而背景却在不断地变化，因此在使用基因算法进行适应度改进时，无法给染色体的适应度赋予一个固定的值。这个问题对于复杂系统来说是普遍存在的。对于这个问题的处理，是让模型中的每一个适应主体的“福利状况”都来自于与其他主体的交互作用，而不是一些预先定义好的适应度的数值。

这样一来，我们就进入了一个新的领域。现存的模型，即使在最简单的情况下，都极少反映这样的，调整适应度的隐含方法。亚当·斯密（Adam Smith）1776年在他的《国富论》一书中讨论的所谓PIN工厂的产生仍是一个谜。这个工厂的例子是关于生产线的最早的例子中的一个：一个工匠取出金属丝，另一个把它修剪成一定的尺寸，下一个人则把头削尖，等等。结果生产效率是单个工匠独立工作的10倍。斯密和后来的评论家对相关因素进行了许多讨论，比如专业化、更高效率的学习、批量购买等等。但我们没有任何模型能演示各个独立的技能工匠组织成为一个工厂的转变过程。是什么活动和主体之间的交互作用导致了组织聚集？促进聚集产生的适应机制是什么？给PIN工厂的适应度赋予一个高分并没有太大意义，也不能增进我们的理解。适应度必须产生于具体的背景之中。

在这一章的后面部分，我们给出了15个利用计算机建模和仿真的案例，这些例子中既有连续系统又有离散系统。连续系统是指系统状态随时间连续变化的系统，系统行为通常是一些连续变化的过程。连续系统模型通常是用一组方程式描述，如微分方程、测绘女冠、差分方程等（如人口的变化过程，疾病的传播过程等）。在离散事件系统中，表征系统性能的状态只在随机的时间点上发生变化，且这种变化是由随机事件驱动的，在两个时间点之间，系统状态不发生变化。计算机建模仿真作为一项应用技术，在实现系统仿真时，一般遵循以下基本步骤。

1. 提出问题（研究的目标）

系统建模仿真是面向问题而不是面向整个实际系统，因此，首先要在分析、调查的基础上，明确要解决的问题，以及所研究的目标。一般而言，被解决的问题是一个较大而复杂的问题，当其他的办法不太好解决时，才转为用计

计算机建模或仿真的手段。对所研究问题的性质是在此阶段逐渐明确起来的。这一步的工作应由研究该问题的专家完成的。

2. 了解准备应用的领域的基本理论

计算机建模往往针对的是一些复杂的系统，例如经济系统、社会系统或生态系统等。在确定研究的问题时，要弄清楚问题背后所处的背景和该问题的理论框架。研究经济系统要了解一些基本的经济学原理，如投入产出规律、完全竞争市场的一般假设、市场供求关系的一般规律以及信息经济学等。研究社会系统需要了解一些人与人之间社交关系、基本的道德行为规范、法律法规以及心理学等方面的知识。研究生物进化要了解变异、遗传和自然选择的相关理论。只有具备了所研究问题的背景知识，在建立模型时才不会做出有悖常理的假设，才会把握住问题的主要方面，才不会使整个模型偏离大的目标和方向。

根据目标，清晰地定义系统边界，辨识主要状态变量和主要影响因素，定义环境及控制变量（决策变量）。例如，超级市场的营业额除取决于市场本身外，还受停车场的影响，如果市场附近没有停车场或停车场太小，要停车的顾客将自动离去。所以建立这种超级市场的数学模型时要明确它的边界，究竟包不包括停车场。如果包括，则停车场是系统的组成元素，如果不包括，则停车场是系统的外部环境，它对市场的影响是作为约束条件来处理的。

但是有些系统具有明确的边界，而有些系统的边界并不明确，例如社会中的经济系统、文化系统、教育系统等。某些复杂系统的边界有模糊性，元素从属于它到不从属于它是逐步过渡而非“一刀切”的。有些情况下，不同系统在其相邻部分相互渗透，你中有我，我中有你，无法通过有限的步骤明确地划分开来。在这种情形下应用系统方法，对象系统的划分常常因人而异，需特别谨慎，力求最大限度地排除主观因素。

3. 收集和組織数据

系统越复杂，决定系统功能的因素就越多，因此建模时一定要设法找出对功能最有决定影响的那些因素，把它们作为主要的变量。

有时候数据的组织非常简单，然而当要记录的数据增多的时候，数据的组织就变得很困难。现代实验物理学家长期苦苦地思考，在什么条件下应该使用什么仪器和测量方法。理论推导的需要以及目前理论的缺陷都会促进这些方面的发展。对实验者产生重要启示的关键性实验能够表明某些假定的规律或机制是否足以产生预期的数据。在实验设计过程中，研究者需要决定包括什么，不

包括什么, 以及什么需要保持不变 (如果是可以支配的话)。在这种情况下, 实验者只不过是组织实验条件来组织数据。

然而, 在这种数据的抽取和组织方面, 复杂系统会遇到一些根本性的困难。比如, 在天文学中, 实验者是无法让实际系统停下来在不同的条件下再运行一遍, 他们甚至在从哪个角度观测系统方面都要受到一些限制。经济学家可能确信高利率会妨碍长期投资 (LONG-HORIZON), 但是这个论断是无法用受控条件下的实验来证实的, 即使经济学家有足够的实验能力也不能这样做。几乎所有的复杂自适应系统都遵守所谓“第三哈佛生物学定律”——只要有认真的研究计划, 一定的控制条件, 使用经过挑选的主体, 复杂适应系统就能够按照人们的要求, 产生出种种预期的表现。

4. 选择方法和工具

根据问题的目标及专业知识, 确定一种具体的建模方法。在这个阶段, 要不断地使原问题抽象化、概念化, 既要把原系统的结构变化成模型的结构, 也要能从模型的构件中归纳出原系统的实际含义。

系统模型是面向问题和过程的。在离散系统模型中, 主要应根据随机发生的离散事件、系统中的实体流以及时间推进机制, 按系统的运行进程来建立模型; 而在连续系统模型中, 则主要根据系统内部各个环节之间的因果关系、系统运行的流程, 按一定方式建立相应的状态方程或微分方程来实现仿真建模。

这里我们要重提一下动力学系统建模方法, 动力学系统理论给我们提供了描述系统动态行为和演化规律的模型, 提供了系统分析的语言, 它不但可以用于连续系统, 如耗散结构理论、协同学中对自组织和系统演化的描述, 而且可以用于离散系统, 如元胞自动机、随机布尔网络、神经网络和 L—系统中对自组织和系统演化的描述。因此, 特别适用于描述复杂系统的整体性、稳定性、适应性和演化。这种研究复杂系统建模方法的特点是:

- (1) 从所论系统的低一层进行研究, 涉及的单元 (元素) 数量较大;
- (2) 单元 (元素) 局部连结, 寻找局部连结规则;
- (3) 用吸引子来定性描述系统整体与局部的关系;
- (4) 从单元 (元素) 之间的相互作用体现系统整体的涌现性。

其次, 建立模型还要选择恰当的建模工具。对于系统动力学相关的模型, 通常选用 DYNAMO 语言, 模型采用因果关系图和流程图的形式; 离散系统 (例如排队论) 的模拟常常选用通用仿真系统 GPSS 语言, 模型将采取实习流和模块图的形式; 模拟一系列独立的个体要通过独立的事件进行交

互，最常用的当数 Swarm 了，它是一种自下而上的建模工具；对于模拟鸟群蚂蚁等人工生命问题，可以用 StarLogo 或 NetLogo；解决运筹学问题求最优解，Excel 则是一个非常不错的选择。关于这些常用的建模语言和方法这里不再赘述。

5. 模拟实现

在把原系统的概念、规律和结构抽象成计算机模型的概念、规律和结构的基础上，接下来就是要实际动手用计算机语言编制程序，得到确定的可在计算机上实验的模型。随着计算机模拟工具的不断发展和功能细化，建模者已经不再需要自己去编写所有的程序代码，目前很多的建模软件都集成了友好的用户图形界面并提供输入输出等功能模块。为了使模拟运行能够反映系统模型的运行特征，必须使程序与模型在内部逻辑关系和数学关系方面具有高度的一致性，使程序运行结果能准确代表系统模型应当具有的性能。在模型规模较大或内部关系比较复杂时，仍需对模型与程序之间的一致性进行验证。通常采用程序分块调试和整体程序运行的方法来检验程序的合理性和正确性。

经过确认和检验模型，就可以在实验框架指导下在计算机上进行运行，通过反复改变初始条件的参数值和规则，了解模型对各种不同输入及各种不同仿真方案的输出相应，通过获取的所需实验结果和数据，掌握系统的变化规律。

6. 对结果进行分析评价

对模型进行多次独立重复运行可以得到一系列的输出响应和系统性能参数。检验模型是否正确，常用的方法就是将模型的结果与可能收集到的实际数据进行比较。除此以外，也要看模型在多大程度上代表真实的系统，也就是要对模型的代表性进行确认。首先，由熟知该系统背景知识的专家对模型作直观和内涵的分析评价；然后，要对模型的假设、输入数据的分布进行必要的统计检验和统计推断。从输出结果或模拟的系统变化趋势中去挖掘模型所代表的实际意义。

建模工作的最后一步，也是整个建模的目的，就是进行系统评价和决策。系统评价是对系统开发提供的各种可行方案，从社会、政治、经济、技术的观点予以综合考虑，全面权衡利弊得失，从而为系统决策选择最优方案提供科学的依据。在确认模型正确的基础上，从输出结果或模拟的系统变化趋势中去挖掘模型所代表的实际意义，以及它的应用价值。

以上几个阶段可用框图的形式表示，如图 5—1 所示。

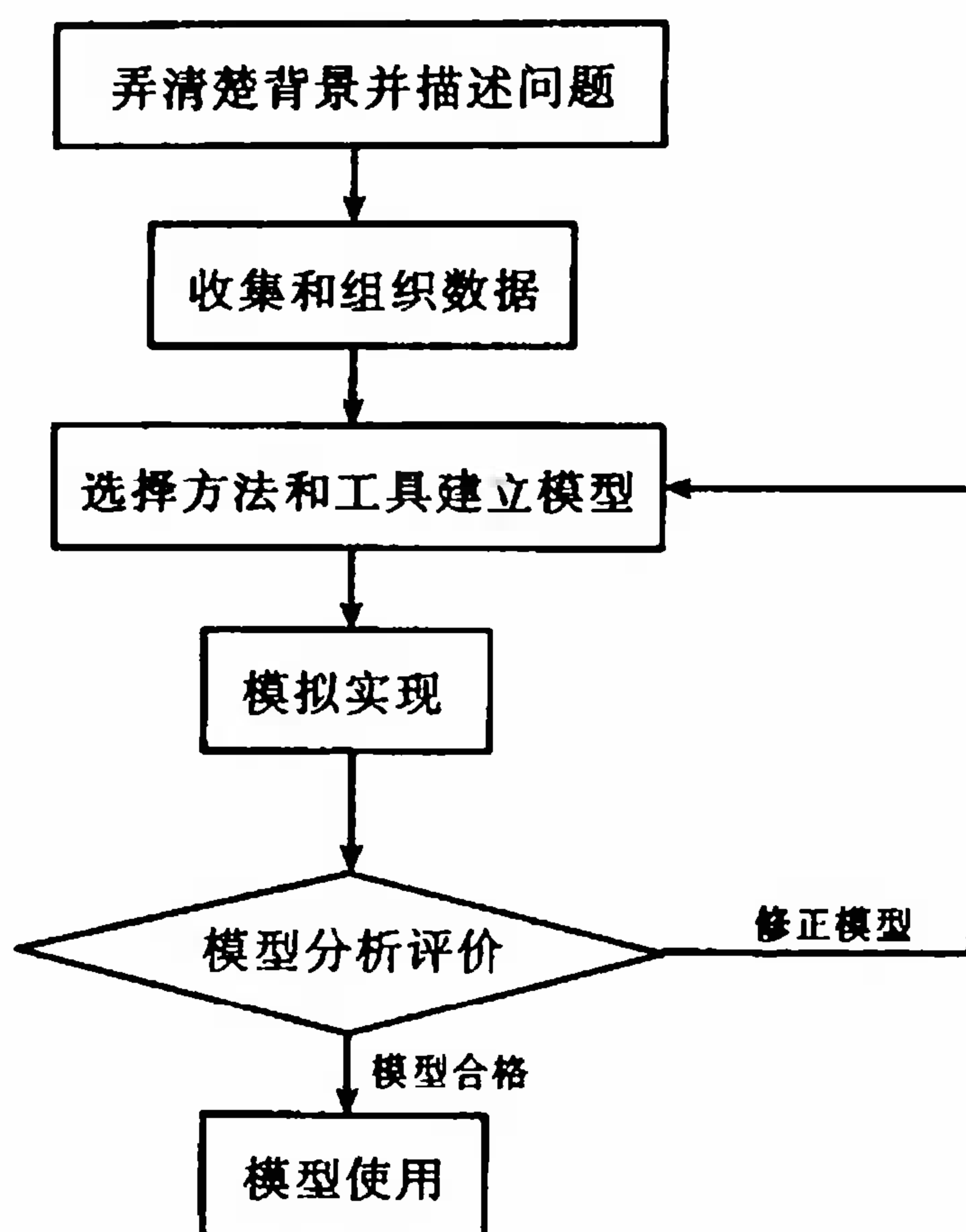


图 5—1 计算机建模和仿真的一般步

建立模型是一种艺术，它有许多技巧。除了知道上述基本步骤，还要动手多建立一些有用的实际模型，并且在实践中要善于思考，不断地总结和提炼，才会提高建立模型的技巧。

四、研究系统科学的成功要素

1. 研究目标的有限性

概念整体论的哲学学说宣称所有科学（包括我们的信仰）都是一个网，它必须面对作为一个整体的经验，并且被当作整体进行修正。我们不可能在单个理论中验证一种假说，因为通过改变概念框架中的其他假设，我们可以消除相反的实证数据对假设构成的威胁。如果我们必须同时解决所有问题，并且每当实际数据引出新问题时，我们就改变整个概念结构；如果我们必须对复杂系统全面做出概念化概括，那么很可能我们现在仍然处于石器时代。通过把目光聚焦于复杂系统有限的一个或几个方面的问题，对一些细节进行近似化、理想化或是将其删去，不仅使我们对世界的认识变得更加稳固，我们还看到了多得多的微观、宏观现象。

2. 领域知识和模型方法的有机结合

模型是致力于解决实际问题的，因此必须保证模型的建立和模型的结果都

具有实际的意义，这就要求把领域知识和模型方法有机地结合起来，研究社会系统的经济行为、信息传播、交通、传染病等大量个体相互作用、相互影响的系统，可以选择多主体建模（Agent Based Modeling）的思想和方法；研究生态系统食物链、生产订货等问题，可以建立系统动力学模型；研究库存、车站码头、人力物资调度等问题，应用排队论的知识建立模型。处理系统中出现的不确定性问题，或对数据进行定性分析，则会用到概率论的思想和统计的方法。

同时，可以用同一种方法建模的系统往往其背景是不同的，设计模型的相互作用机制、演化发展过程，应该在该实际问题的理论框架指导下进行。偏离或违背这个领域内的规律或常识，模型就不能反映真实系统，得出的结果也将会毫无意义。

3. 数据基础的保证

为了对复杂系统进行建模和仿真，除了要有必要的输入数据以外，还必须收集与模型初始条件及系统内部变量有关的数据。这些数据往往是某种概率分布的随机变量的抽样结果，因此需要对真实系统的这些数据做必要的统计调查，通过分布拟和、参数估计以及假设检验等步骤，确定这些随机变量的概率密度函数，以便输入系统模型实施运行。

4. 统计方法的合理使用（不确定性思想的合理运用）

在世纪末“科学之终结”的阵阵感叹中，普利高津发言了：“科学不会终结，……人类正处于新理性诞生的转折点上，未来的科学将不再以确定性为基准……”。对于不稳定系统，我们必须在统计水平上描述动态过程的基本定律。

混沌理论告诉我们：经济的和其他社会的变量之间的非线性关系，能产生混沌行为，从而导致系统的不确定性；混沌行为对初始条件具有严重的依赖性，系统初始条件的一小变化，最终能带来行为结果的巨大变化，这就是所谓的“蝴蝶效应”，即一个原以为可以忽略不计的微小变化（“南美洲一只蝴蝶扇动翅膀”），可以造成系统的面目全非（“在北美洲引起了一场风暴”）。一些混沌理论家认为，若存在混沌行为，则中长期预测（所谓“人的理性预期”）完全没有意义；由于初始位置无法把握，加上各种随机的误差，未来是测不准的。同时，混沌理论还说明，简单的系统可以产生复杂的行为，确定的系统可以产生不确定的行为。

统计方法的使用不但体现在对基础数据的处理和结果的分析上，它更是对待事物、研究问题的一种思想观念。常用的统计方法有：回归分析、主成分分析、点估计、区间估计、假设检验和聚类分析等。除此以外，处理不确定问题

的数学方法还包括模糊集合和模糊逻辑、遗传算法、随机网络分析等。正确认识确定性和不确定性的辩证统一，把握系统层次间质的差别和层次间的转变和联系，采用定性理解和定量分析的方法去建立模型，是研究复杂系统的成功要素之一。

5. 对于结果的客观分析

模型的解是对系统开发提供的各种可行方案，要从社会、政治、经济、技术的观点进行综合考察，全面权衡利弊得失，为系统决策提供最有方案。对各个方案的分析评价可以从下面几个方面予以考虑：目标、可行性、费用、效果。对不同的可行方案做出谁优谁劣的比较，而且要保证比较的客观性，最好要建立一套完整的评价指标体系。指标体系的建立可以使用德尔菲法，即经过广泛征求专家意见，反复交换信息，统计处理和归纳综合。

第二节 案 例

在这一节里，我们汇总整理了中国人民大学经济科学实验室历年做过的一些有代表性的 12 个模型案例。这些模型涵盖了信息经济、市场供求、宏观经济、疾病传播、交通问题等经济社会生活的多个领域。在接下来的章节中，我们大致会从问题的背景和领域知识的简介，模型的定义和描述，模型的实现、运行的数据（或图表）、结果分析这几个方面对每个模型进行比较详细的介绍，以期读者对如何运用系统科学的思想结合计算机工具来分析和解决实际问题有一个初步的认识。

一、阿克洛夫模型

（一）背景和基本概念

阿克洛夫模型是信息经济学中的一个经典模型，它描述的是在非对称信息环境下的“不利选择”问题，揭示了在某种特定的情况下，市场如何变得低效率。

不利选择是指在建立委托人—代理人关系以前，代理人已经掌握了某些委托人不了解的信息，而这些信息有可能对委托人不利；代理人利用这些信息签订对自己有利的合同，而委托人则由于信息劣势而处于不利的选择位置上，这就是所谓不利选择。

目前有关不利选择问题的研究基本上是从产品销售、保险和资本市场三个方面展开的。阿克洛夫模型以旧车市场上的旧车销售情况来解释产品销售方面的不利选择问题。

在一般情况下，人们要想确切分辨出旧汽车市场上哪些是高质量汽车，哪些是低质量汽车是困难的。一辆外表全新的汽车也有可能是低质量汽车。由于买主无法了解汽车的质量，所有外表相同的汽车都将以同样的价格出售。这样，高质量的汽车在旧车市场上就无法以预期的高价格出售。这对于卖主是不利的。但另一方面由于高质量的车的确有可能在旧车市场上存在，顾客偶然也能在这里以买卖双方都满意的价格买到高质量的车。这样就使得低质量汽车的卖主不愿意以较低价格卖出，直到旧汽车的低质量性质充分显示出来为止。从买卖双方的分析可以看出，从效用最大化的角度来讲，人们更愿意培养低质量汽车占大多数的旧汽车市场，因此，拥有高质量汽车的卖主往往将他们的汽车撤出市场。这样旧汽车市场上汽车的平均价格在下降。简单地说，那些低质量的汽车将高质量的汽车排挤到市场之外。这就是一个典型的不利选择问题。

由此，阿克洛夫模型解释了为什么即使是只使用过一次的“新”汽车，在旧汽车市场上也难以卖出高价。更为重要的是，这种现象与传统经济学概念——商品质量决定其市场价格——相悖，在非对称信息环境中，商品质量依赖于价格。这也是市场参加者以价格判断商品质量的信息经济学解释。当然，实际的经济环境比上面的分析更复杂，因为市场不仅仅是由高质量和低质量的车组成的，而且随着各种因素的变化，市场中旧汽车的质量也会发生变化。

综上所述，汽车的市场价格依赖于市场上所提供的汽车的平均质量，而市场上提供的汽车的平均质量又取决于汽车的市场价格。于是，开始在高价格水平上，许多汽车都被置于市场上出售，这样，市场上汽车的平均质量也就随之升高了。然而随着大量汽车被置于市场上出售，市场逐渐出现供大于求的现象，从而导致市场价格的下降。当市场价格降到一定程度以后，那些高质量汽车就被撤出市场，从而导致汽车市场的平均质量进一步下降。结果汽车的边际效用随之降低，而人们愿意支付的价格也就越来越低，如此循环。最后市场充斥着大量低质量汽车，这样产生的销售合同肯定是非常少的，这种市场最终由于人们对低质量汽车的需求丧失而消失。很明显这是一种低效率的市场。

我们从不利选择的理论上进一步总结这个汽车市场的例子。在一般商品销售市场上，产品质量的不确定性是不利选择的根本原因，而基于产品质量不确定性基础上的市场信息差别是不利选择的直接诱惑因素。当市场商品以不同质量交换时，买卖双方都将以同样方式按照产品质量将产品进行分类，但是，只

有卖主能够观察到他们所销售的每个单位产品的质量，而买主在购买前最多只能观察到产品质量的分布，也就是说，买主在购买产品前并不能确切了解每个单位产品的具体质量，最多只能了解这类产品质量的平均分布。由于没有其他任何方式使买主确定每个单位产品的具体质量，这样，低质量产品往往随着高质量产品一起销售。从买方市场看，在这样的市场中进行选择是不利的。

(二) 阿克洛夫模型的 Swarm 实现

我们利用 Swarm 建立阿克洛夫模型，观察其运行状况是否与所预测的相符，同时也希望以此检验 Swarm 工具的可用性。这个模型所涉及的对象是汽车和市场。

汽车：汽车是市场上被交易的一个对象。汽车的价格是由其质量决定的，为简便起见，认为该汽车市场上只有两种汽车，分别是高质量的和低质量的，其期望售价分别为 4 000 美元和 2 000 美元。每一辆进入市场的汽车都有相同的被询价的可能性。一辆汽车被询价之后，如果买方给出的价格高于期望售价，则交易成功，否则按照一个给定的较低概率成交。这与实际市场上的情况是一致的，即一辆汽车赔本卖出的可能性保持在很低的水平上。实际上模型中的一个汽车对象代表了汽车与其卖主的总和（汽车的属性和卖主的行为）。

市场：市场是模型涉及的另一个对象。这里，市场被设计成容量是固定的。市场能够记录当前的高质量 and 低质量汽车的数量，也能记录当前卖出的高质量和低质量的汽车数量。市场上的交易是一轮一轮进行的。为表示出市场上交易双方的信息不对称，对于卖方，汽车的信息是完全的，即卖方知道汽车是高质量的还是低质量的，但是买方并不知道汽车是高质量还是低质量的，只能根据上一轮的交易情况预测本轮交易中市场上高质量和低质量汽车的比例，并以此为基础给出买方购买汽车的期望价格。市场上发生交易后，需要有新的卖方进入市场，一辆汽车如果在多轮交易后还不能被卖掉，将自动退出市场。考虑实际市场的情况，新的卖方进入市场时，被卖车辆是高质量的还是低质量的也是由上一轮交易中卖出的汽车质量高低的比例决定其概率的。

上述两个对象各自有自己的行为动作。对于卖方来说，每轮交易中每辆汽车根据给定的概率决定自身是否被询价，一旦被询价则判断卖方与买方各自的期望价格，如果买方出价高于卖方的价格则成交，否则按照一个较低的给定成交率决定是否成交。市场在本轮交易结束后的动作是统计本轮交易中成交的汽车质量高低的各自数量，并且根据该数量计算下一轮交易的买方期望价格。对于交易完成的汽车和那些多轮交易后仍不能成交的汽车，则自动退出市场，由新的汽车补充进来。

根据上述模型建立起对应的 Swarm 模型，并实际运行，可以看到模拟的结果与该模型的理论预测^①一致。如图 5—2 中所示，控制面板控制模型运行的开始、结束和分步运行；观察员 CarsMarketObserverSwarm 设置其刷新频率；CarsMarketModelSwarm 设置参与汽车的数量和被询价的概率；阿克洛夫模型的窗口则显示随时间的变化所有汽车销售价格总和的变化情况。从图中还可以看到市场上所有汽车销售的总价格逐渐下降，说明高质量的汽车被逐步挤出了市场。

阿克洛夫模型的运行结果如图 5—2 所示。Swarm 在这里提供了四个窗口，分别显示参数及模型的运行结果。这就是 Swarm 典型的运行环境。研究者可以利用 CarsmarketModelSwarm 和 CarsmarketObserverSwarm 两个窗口调整运行和观察的有关参数，用控制窗口反复运行和观察其结果。

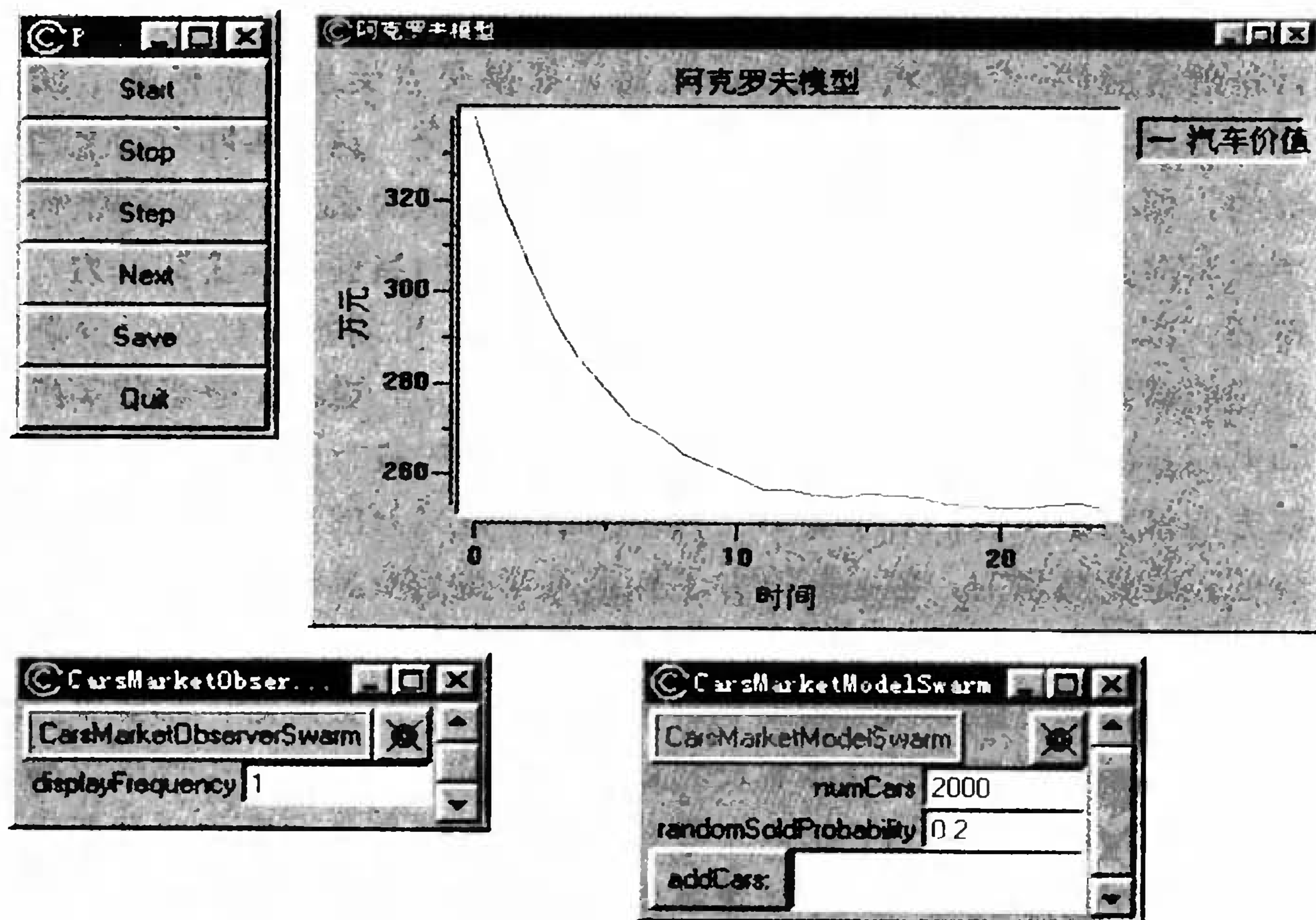


图 5—2 Swarm 阿克洛夫模型的运行结果

(三) 阿克洛夫模型的进一步分析

根据阿克洛夫教授论文中的描述，在上述模型中，假设市场上仅仅存在两

^① 参见阿克洛夫 (George A. Akerlof) 于 1970 年在经济学期刊《Quarterly Journal of Economics》发表的题为《The Market for “Lemons”: Quality Uncertainty and The Market Mechanism》的论文。

种品质的汽车：高质量的和低质量的（分别用价格 4 000 和价格 2 000 表示）。市场被作为信息发布的场所，根据前期交易的结果来预测本期交易的预期价格，同时市场容量保持不变，有汽车交易发生或在预期时间内没有实现时交易主体退出，则补充相同数量的卖方或买方进入市场；买方主体被容纳到市场当中，即买方被视为一个整体，所有买方的行为无差异，均按照市场预测的交易价格制定相同的购买策略。卖方主体则通过汽车体现，假定卖方对于汽车的质量高低具有完全知识，按照某种成交概率进行。在这样一个模型框架下，市场行为表现为低质量汽车的成交保持上升趋势，而高质量汽车则由于买方预期的价格低于卖方期望售价，从而无法成交退出市场。这样在信息不对称的情况下，汽车市场确实表现出了高质量汽车被挤出的行为特征。

这里我们先对阿克洛夫模型在设计上存在的超现实的约束前提和机制进行分析，然后提出完善的和增强设计的思路。

原阿克洛夫模型存在以下几点不足。

1. 买方行为被平均化

在模型中，通过市场收集前期交易的结果，然后根据高质量和低质量汽车的交易比例，确定下一期市场的平均价格，并以此作为下一轮交易中买方的预期价格。这种机制实际上是以典型主体替代了个体的差异，隐含了买方行为平均化的前提，即所有买方只愿意根据市场交易的结果的平均价格购买汽车，并且所有买方对于购买汽车的质量预期是无差异的。实际情况下，买方由于知识和预期的差异性，在购买汽车的行为上存在区别，如乐意以合理价格购买高质量汽车，或者“错误地”买到了与价格不符的低质量汽车。问题的关键在于：对买方而言，不存在从质量到价格的可观测和验证的映射关系。在买方行为被平均化、典型化的机制设计下，当市场平均交易价格作为所有买方统一的、惟一的购买策略指导，且买方将价格作为汽车质量的区分方法时，该前提导致的必然结果就是不会有人购买高质量汽车，高质量汽车无法进行交易从而退出市场。在现实中，市场是交易的场所而非交易主体，交易的进行由卖方和买方议价进行，因此有理由认为需要将买方作为独立的主体引入，以表现出不同买家的行为差异。

2. 指标单一

按照阿克洛夫模型的传统描述，对于汽车的信息不对称反应在汽车质量的无法观测上。即买方不能够通过汽车价格判定汽车质量，而卖方更愿意接受高于个人汽车质量对应价格的交易价格。这种矛盾是高质量汽车挤出效应的本因。为保护个人权益，迫使买方试图通过压价减少因质量无法观测而导致“错

误交易”（即以较高价格购买了较低质量汽车）的可能性和损失。由此可知，对于汽车的指标应该至少存在于两个方面，即价格方面和质量方面。在模型中，仅仅具有价格信息，并以价格信息作为买卖双方对汽车质量的共同观测基础，将二维模型指标简化为一维，实际上存在指标单一的缺陷。

3. 价格分布单一

汽车价格在模型中服从 0—1 分布，即高质量汽车的价格恒等于 4 000 货币单位，低质量汽车价格恒等于 2 000 货币单位。不难看出，在价格恒定的情况下，市场交易活跃度降低，从而又会导致卖方退出的倾向，这也影响了对于信息不对称情况下挤出效应的分析。在现实中，如果缺乏可信的评估机制而由卖方自行定义价格，则由于卖方理念的差异而导致汽车价格是离散的。此外，由于交易是通过买卖双方议价进行的，所以交易价格不一定以定价为准，而是双方妥协的结果。因此，我们认为应该在模型中讨论交易价格离散的情况，并允许买卖双方议价机制的存在。

4. 信息匮乏

模型中市场交易的历史结果是通过总交易量中高价汽车和低价汽车的比例反映，并以此作为公共知识发布给买方作为预期定价的指标，同时以此作为筛选新卖方进入市场的机制。这样，随着低价汽车交易的增加，买方将会降低预期定价，而高价汽车的新卖方也将会被市场筛选出局，随之市场逐渐低迷。也就是说，模型结果是被预先定义的，是这个负反馈的必然结果。实际上，公共知识的发布对于市场影响十分重大，选择什么样的市场信息供给，将会对整个市场的交易产生重大影响，而市场信息供给存在多种选择。此外，个人在消费过程中往往受到相似个体经验的影响，而影响一个汽车市场的繁荣程度的另一个重要方面是所有历史参与者的反馈和传递，比如“我确实以合理的价格买到了一款不错的汽车”。诸多历史交易者的反馈意见作为一种市场交易的评价体系，应该通过某种机制引入，从而影响市场后续交易的进行。这可以被认同为某种“口碑”或“品牌效应”。在品牌效应和反馈机制的作用下，评价较高的市场交易活跃程度将会高于评价较低的市场。

以上阐述的不足基本上是阿克洛夫模型本身的缺陷。基于以上分析，在此我们建立了一个包含多种主体、引入反馈机制和市场竞争机制、商品指标多样化的经济模型，也以阿克洛夫教授关注的旧汽车市场为背景；其主要目的是通过对比不同的市场机制、不同的定价策略、存在信息发布时对于市场规模和交易质量的影响。

(四) 改进的阿克洛夫模型

1. 模型前提

与阿克洛夫的旧汽车市场模型不同, 这里假设旧汽车的质量满足 $[0.1, 1.0]$ 区间的平均分布, 这样可以避免 $[0, 1]$ 分布下价格单一、过于简单的假设; 假设卖方对于汽车的评价不同, 存在合理定价和不合理定价两种评价方法; 假设市场容量不变, 维持市场上存在等数量的买方和卖方; 假设买方不存在对汽车质量进行观察的能力, 并且买方不能根据汽车质量的分布函数得到期望价格; 假设买方的购买策略决定于买方的预算和市场的平均满意程度, 而买方预算因人而异。

2. 模型主体及行为模式

模型中主要存在三类主体: 市场、卖方和买方。

(1) 市场: 市场为买卖双方提供交易场所, 并发布历史交易的相关信息。存在两种类型的市场。类型 1 的市场, 合理定价的卖方比例高于不合理定价的卖方 (模型中约定为 7 : 3), 类型 2 的市场恰恰相反, 两者比例为 3 : 7。在模型中, 假定买方和卖方处于相同的规模, 数量都等于 100。市场通过提供交易的历史记录作为公共信息。交易的历史记录实际上是所有交易汽车的列表, 并按照交易时买方对交易的评价将交易划分为 1 至 5 五种级别, 分别对应着交易满意程度 $[0.0, 0.2]$, $(0.2, 0.4]$, $(0.4, 0.6]$, $(0.6, 0.8]$, $(0.8, 1.0]$ 五个区间, 分别表示“很不满意”、“不满意”、“一般”、“满意”、“很满意”五种交易评价, 保存某个满意程度下的交易数量, 并根据各个区间的加权平均计算市场的平均满意程度。此外, 市场提供交易的撮合机制, 允许买方根据预算搜索一定数量的卖方作为备选卖主, 并以市场的平均满意程度为概率成交。市场的平均满意程度、交易汽车的平均价格、平均质量和交易数量将作为模型的输出, 以分析不同类型的市场机制对于交易的影响。

(2) 卖方: 卖方即旧汽车的拥有者。旧汽车的质量服从随机分布, 在模型中通过 $[0.1, 1.0]$ 区间的随机数生成。卖方对于汽车的评价不同, 具有合理定价和不合理定价两种模式。在合理定价模式下, 汽车质量 Q 服从 $[0.1, 1.0]$ 区间的平均分布, 假设汽车质量和价格之间存在线性函数关系: $P = 6\,000 \times Q \times [1.0, 1.2]$; 其中 6 000 表示基准价格, P 表示汽车价格, Q 表示汽车质量, $[1.0, 1.2]$ 表示利润空间, 即卖方随机决定获利数额。在不合理定价模式下, 汽车质量服从 $[0.1, 1.0]$ 区间的平均分布, $P = 6\,000 \times (Q + [0.1, 0.5])$; 这表示卖方将按照质量较高的汽车决定自己的汽车价格, 但欺诈空间为 $[0.1, 0.5]$ 平均分布的随机数。此外, 不同卖方具有不同的期

望交易时间，如果在交易时间内没有实现交易则退出市场。如果交易完成，则依照上述策略引入新的卖方。对于汽车，存在三个指标进行评价：交易价格、汽车质量、交易后买方的满意程度。

(3) 买方：买方为汽车的持币待购者，其预算服从随机分布，在模型中通过 $[0.1, 1.0]$ 区间的随机数乘以 6 000 生成。买方根据市场的平均满意程度决定询价交易的概率，并以“货比三家”的策略在市场上搜索价格在预算上下浮动 5% 的卖主作为目标，加入“联系人列表”。询价完成后，如果不存在联系人，则根据预期交易时间决定等待还是退出。如果存在联系人，随机选择列表中的一个卖方进行交易。如果卖方定价小于预算，则按照卖方定价交易；否则交易价格将选定为预算到定价区间上的一个随机数，以此来实现讨价还价的过程。交易实现后，假定此时买方对于汽车的质量已经可以观测，买方将根据交易价格在市场历史交易中寻找“很满意”的交易所对应价格水平下的质量指标，并以自己汽车的质量和“很满意”质量比较，得到本次交易的满意程度，反馈给市场。

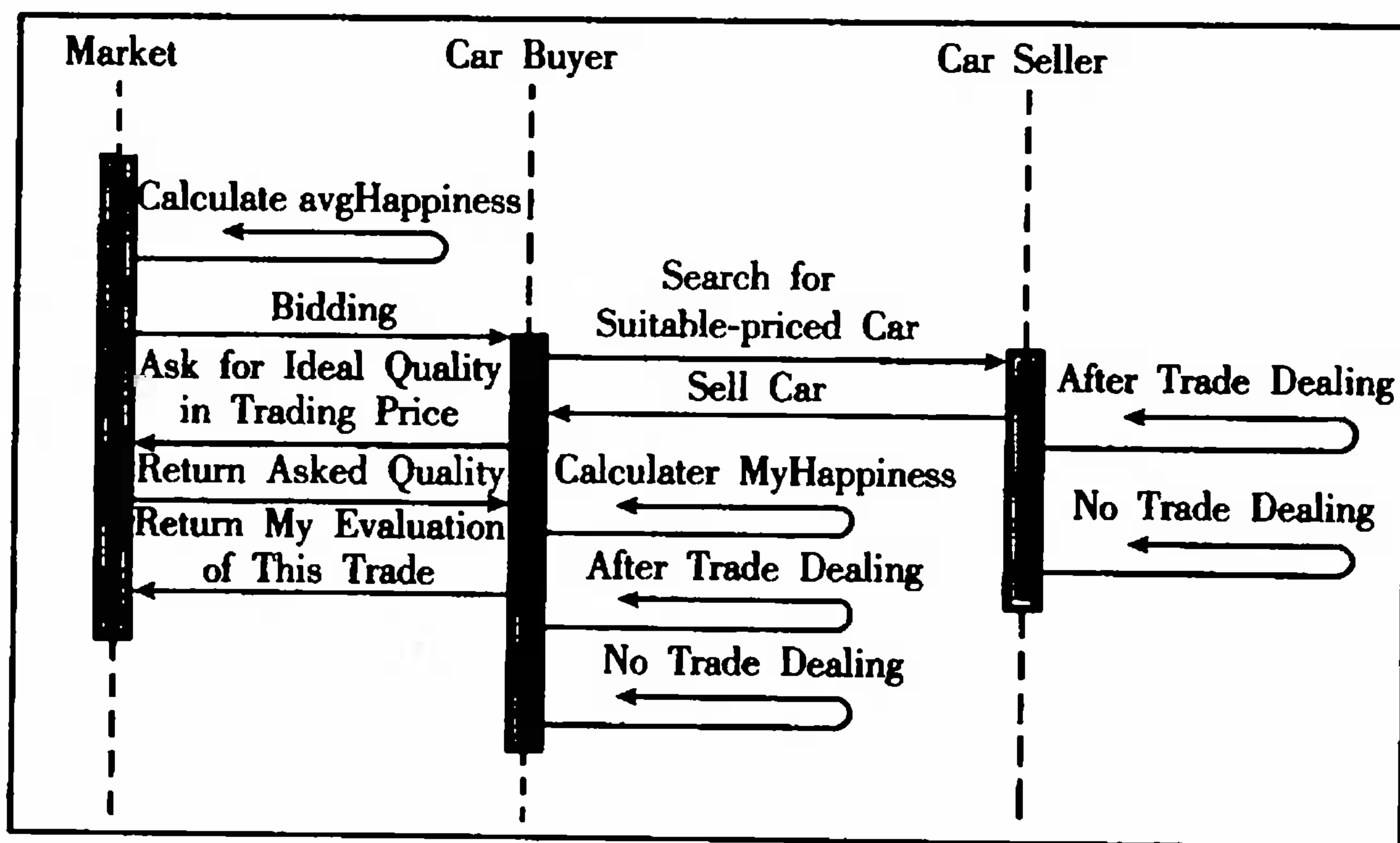


图 5—3 旧汽车市场模型的时序图

在上述模型设计下，基本解决了在前文中指出的四个问题：基于随机数的主体构造保证了买方和卖方具有行为和偏好的差异性，从而避免了行为典型化和平均化的问题；汽车指标由价格和质量共同构成，避免了指标单一化；汽车质量和价格均服从平均分布，解决了价格单一和质量单一的问题，并与不同的定价策略一起，共同体现了卖方对汽车评价的差异性；引入了议价机制；市场

历史交易记录的实现，表现了过往交易后买方对交易的评价，从而引入了反馈机制，体现了口碑的作用。在这样的设计下，我们可以得到一个远比阿克洛夫旧汽车市场复杂的经济模型，而模型在假设条件上比原模型要宽泛得多、更加接近现实的状况。

这个模型是基于 Swarm 软件包实现的。

(五) 模型结果分析

1. 图形分析

模型的运行结果参见图 5—4 至图 5—7。其中 m_1 表示合理定价者占大多数情况下的市场，相应指标用蓝线（深）表示； m_2 表示不合理定价者占大多数情况下的市场，相应指标用黄线（浅）表示。四个图分别比较了在两种市场机制下交易的汽车平均价格、汽车平均质量、买方满意程度、交易数量四个方面的差异。

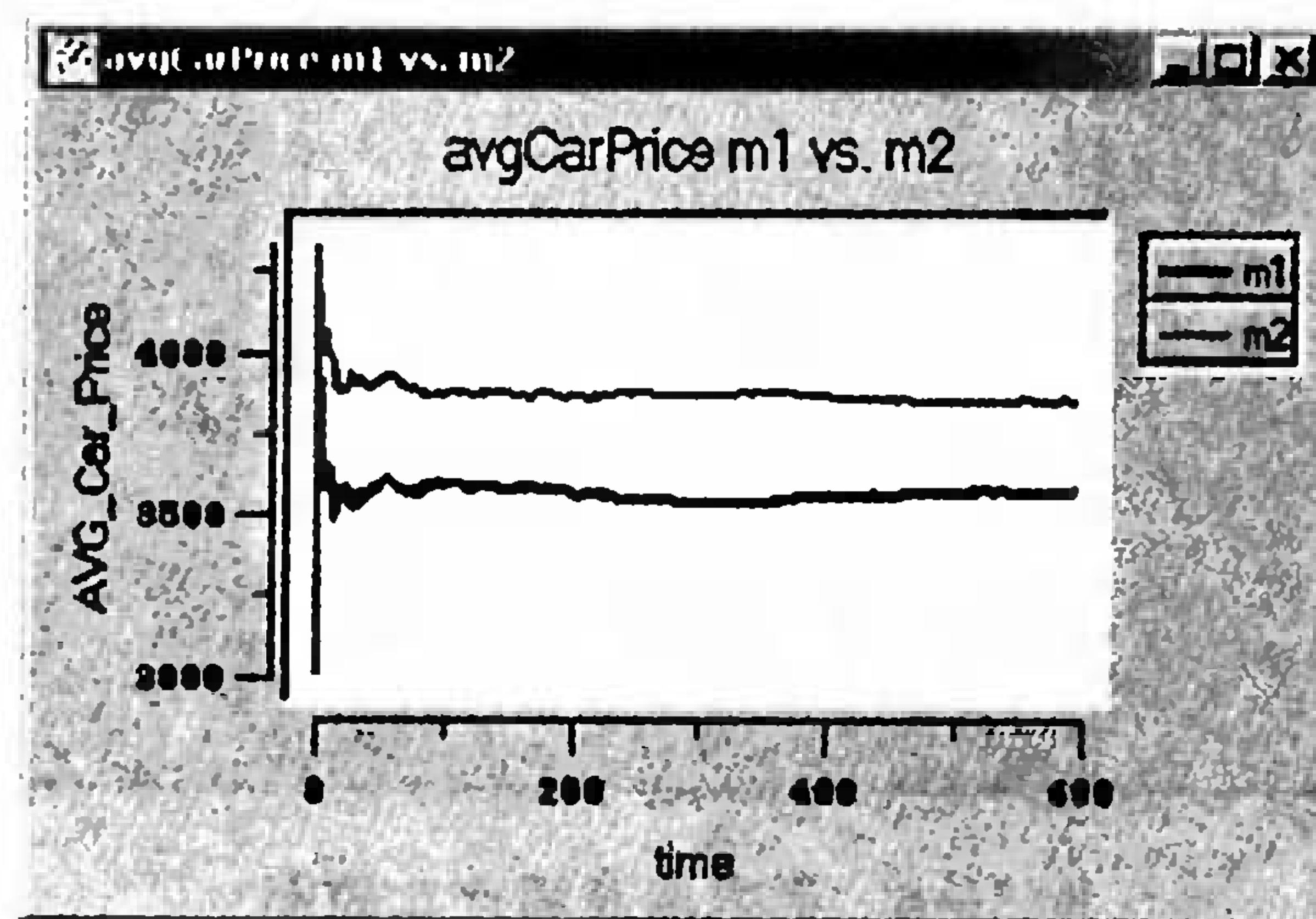


图 5—4 汽车平均价格比较图

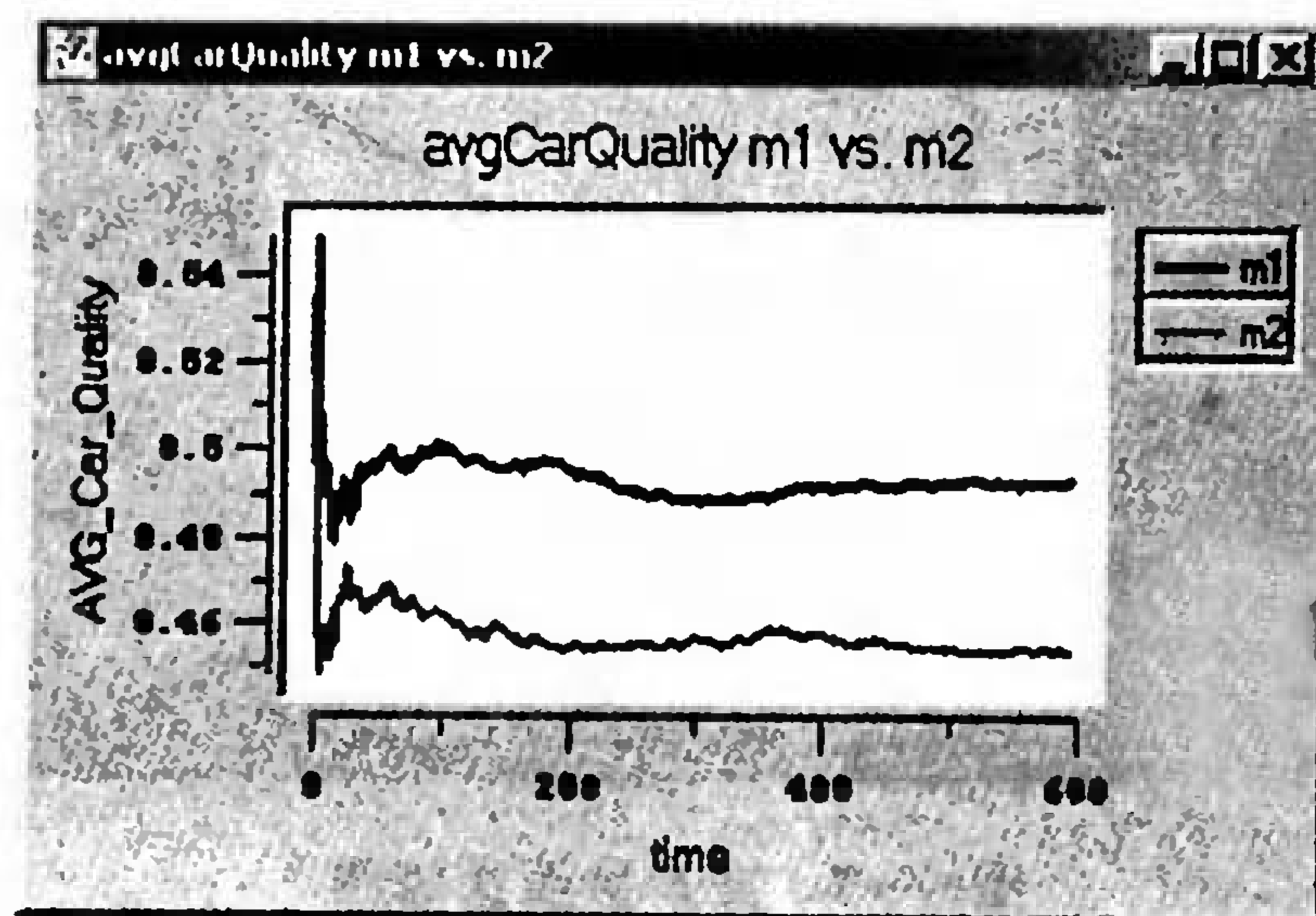


图 5—5 汽车平均质量比较图

在两种形式的定价机制下，两个市场表现出了不同的交易情况。 m_1 市场中交易汽车平均质量约为 0.493，平均交易价格在 3 568； m_2 市场中的交易汽车平均质量为 0.453，平均交易价格在 3 850。这说明在诚信度较高的市场 m_1 上交易的汽车质量要高于诚信度较低的市场 m_2 ，并且 m_1 交易价格低于 m_2 ， m_2 价格因为欺诈性定价而虚高。

对于这样的交易质量和价格差异，两个市场存在满意度的差异。合理定价情况下， m_1 的买方平均满意程度达到了约 0.931，而 m_2 的买方平均满意程度仅有约 0.857；这反映了买方对于市场机制的评价，从而合理定价的市场得到了较高的认同（参见图 5—6）。最终，认同度比较高的市场在交易数量和交易数量的增长率上均高于认同度较低的市场，交易的活跃度更高（参见图 5—7，交易数量的增长率用曲线的斜率表示）。

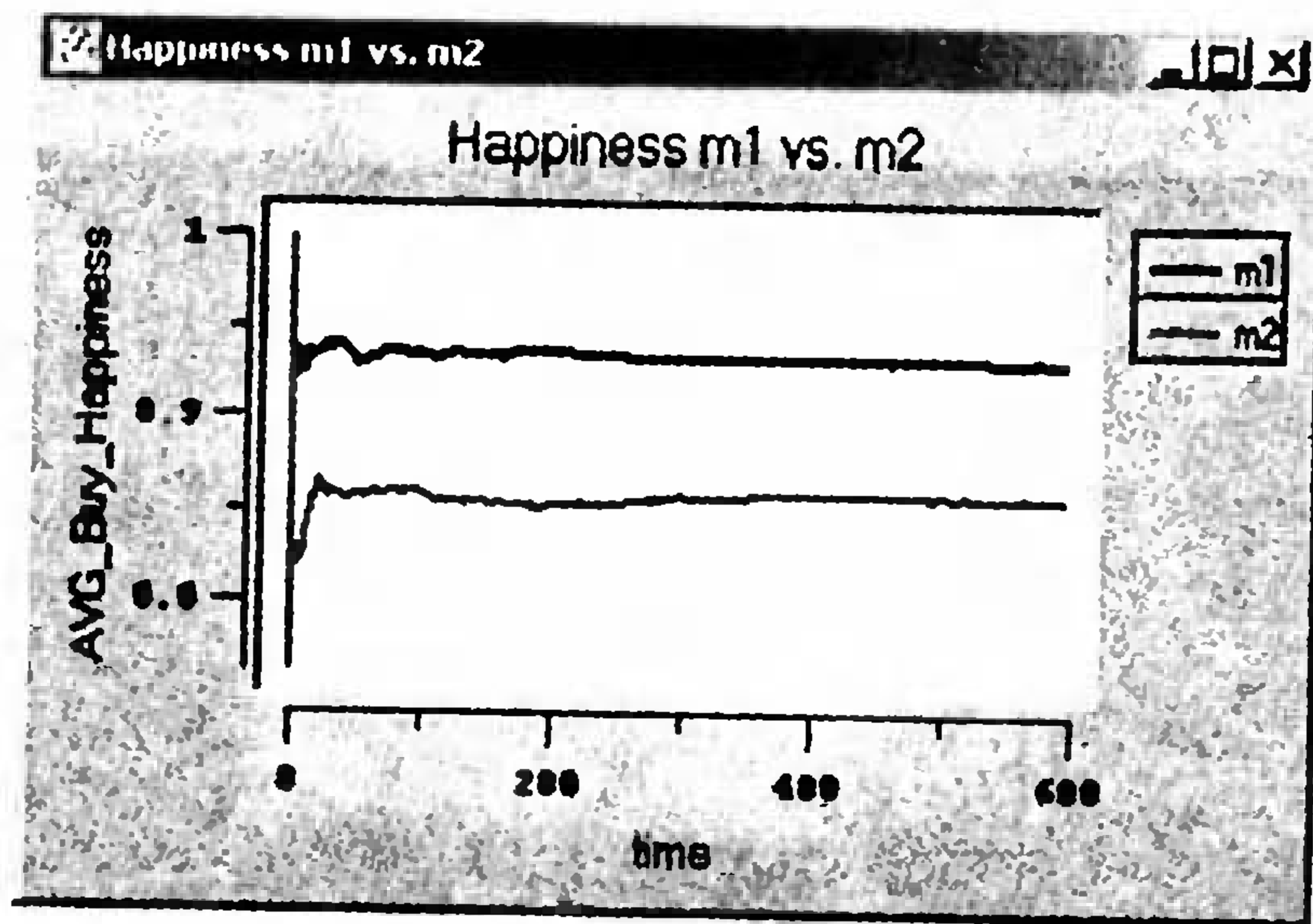


图 5—6 买方满意程度比较图

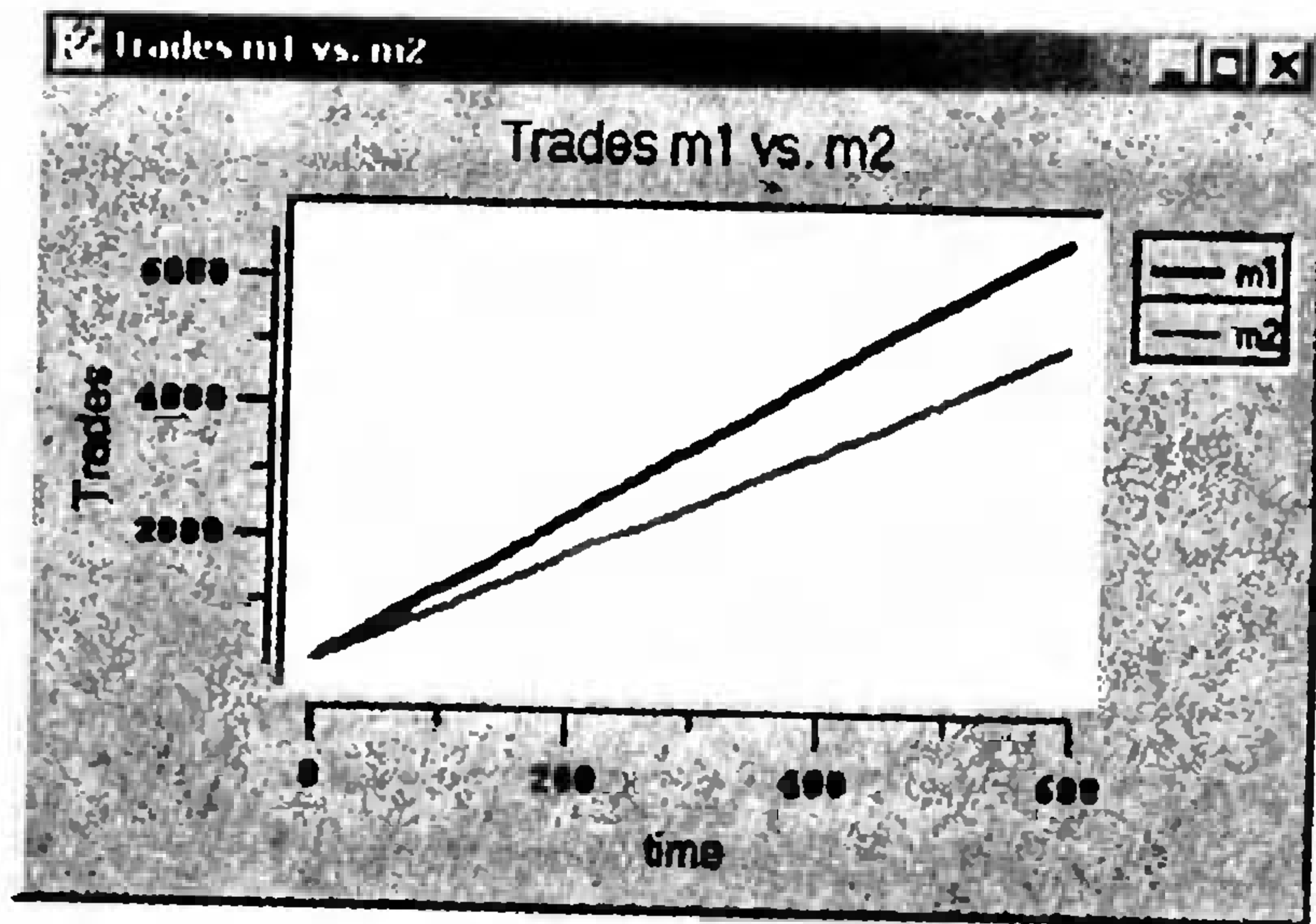


图 5—7 交易数量比较图

上述运行结果表明,对于存在合理的质量评价体系的市场,能够实现在平均交易质量、买方满意度、市场交易活跃度等方面的较高效用;而欺诈性较强的市场则恰恰相反,在上面比较的三个指标中都处于下风。

2. 阿克洛夫模型传统经济分析的比较

按照阿克洛夫教授的分析,在买方按照市场平均质量给出交易价格的情况下,将会出现高质量汽车被低质量汽车挤出市场的现象。张维迎教授在进一步分析阿克洛夫模型的基础上,分别对汽车质量满足 0—1 分布、均匀分布以及买卖双方对车的评价差异等角度进行考察,并得出结论:“在非对称信息下,市场在多大程度上存在,依赖于质量的分布函数和买卖双方评价的差异程度”。模型的运行结果告诉我们,在质量不确定、信息不对称的情况下,如果卖方采用欺诈性定价策略,市场状态呈现出质量较低、满意度较低和活跃度较低的状态。而欺诈性的定价策略,与传统模型中“卖方更愿意以高价出售商品”的行为假设是一致的。模型的运行结果最终证明了传统经济分析的结论:信息不对称的情况下,在卖方效用最大化的期望下,旧汽车市场将会低迷。质量的不确定性和买卖双方的差异,确实是旧汽车市场无法实现最优的关键因素。但是现实生活表明,二手商品的交易在这两种因素存在的前提下仍然交易得十分活跃;也就是说,市场未必需要达到最优仍可以存在。在我们所建立的模型当中,尽管 m_2 存在大量的欺诈性定价,交易数量仍然持续增长,这是符合现实生活的实际情况的。张维迎教授在分析中也说明了这种情况,不过是通过概率方法得出的结论。上述计算机经济建模与传统经济分析相比,主要有以下几点不同。

(1) 假设差异。

前面的模型框架及实现中已经提到,在汽车质量分布、卖方评价、买方评价等方面我们的模型与传统经济分析不同。汽车质量分布和卖方评价,在张维迎教授的论述中已经对阿克洛夫教授的模型进行了拓展,这两个方面至多是模型复杂程度的区别。尤其需要指出的是买方评价部分,不论阿克洛夫教授还是张维迎教授,都从传统的经济分析出发,采用期望均值作为买方的预期。我们认为这种分析方法与实际情况存在差异。期望均值的前提是知道市场上商品质量的分布函数,而在市场容量较大、卖方评价存在差异的情况下,其实买方不可能给出质量的分布函数;而且期望均值作为买方评价,实际上仍然对买方行为进行了典型化的简化处理,不能反映买方行为的差异。在本模型中买方不能得知汽车质量的分布函数,并假定买方作为持币待购者,惟一的交易约束是其预算,并通过询价决定购买行为。基于主体建模在这种情形下比传统的统计平

均方法更具有优势,也更能反映实际情形。

(2) 机制差异。

在传统模型中,主要考察信息不对称下市场交易的状况。为避免可能的损失,当买方可以持续地以市场上汽车质量的期望均值作为定价的策略时,实际上通过这种典型化的方法,问题本身已经变成了一个多轮博弈问题。多轮博弈的结果与一轮博弈的结果将会相去甚远。对于旧汽车这样的生活耐用品,现实中买方应该是一轮博弈方,只是在博弈后往往会通过各种渠道散播自己对交易结果的看法,也就是说存在像蚂蚁激素一样的信息遗存。这种信息遗存可以通过市场公告板发布,也可能在和亲戚朋友聊天中传播。针对这种现象,在我们的模型中引入了信息的反馈机制,允许买方交易后向市场提供对交易的满意程度,也允许买方通过查询历史中满意度较高的交易对自己的交易进行评价。当然这种机制的设计合理与否还值得商榷,并在一定程度上降低了信息的不对称性,但我认为在一定程度上反映了现实,并为市场经济体制下诚信机制的建立提供了一定的分析角度。

由于在模型中卖方评价存在欺诈性和合理性两种策略,除了表现传统模型经济分析中卖方效用最大化的行为模式,实际上还引入了诚信机制。现实生活中,既存在利欲熏心的卖方,也存在公平交易的卖方。在买方可以提供交易评价的机制设计下,两种定价行为也产生了对市场交易的不同影响。在传统模型分析中,仅仅假设高质量卖方会被挤出,这是不够的。卖方之所以离开市场,首先是因为无法达成交易,那么高质量汽车可以被挤出,一般质量的汽车也可能因为无人问津而退出。一个满意度较高的市场会表现出交易总量层次上的高认同度,高质量和低质量的汽车都有可能成交;满意度较低的市场,也只能表现总量指标,不论质量高低都有可能成交。

(3) 方法差异。

阿克洛夫教授和张维迎教授都通过效用函数和概率统计的方法对模型进行了分析,使用的是传统经济理论中普遍使用的数学工具。出于对计算机经济建模的考察和应用的目的,我们的模型是通过计算机程序按照面向对象的方法加以实现,并在模型中广泛使用了随机序列的数据。这两种方法的差异在前文中已经说明,数学工具严谨规范,但常常伴随着主体差异度的缺失;计算机建模在公式化程度上稍弱,但可以提供主体差异度的实现。

(4) 结论差异。

阿克洛夫教授的论文还指出信息不对称可能会导致市场交易数量和质量上的递减;张维迎教授的书中则根据不同情况给出了不同的分析结果。在我们的模

型中,不同市场机制(合理定价和欺诈定价)下交易质量不同,欺诈性定价的市场更加低迷。但是在交易数量上,并没有出现交易数量减少的情况,只是满意程度越高交易数量曲线的斜率越高,市场交易越活跃。满意程度低的市场也只是交易相对不够活跃,但交易数量并没有呈现出增量减缓的趋势。这种现象与实际生活是相符的。

此外在阿克洛夫教授的论文中进一步讨论了诚信的代价(原文中以“The Costs of Dishonesty”为小节题目),指出不诚实的代价不仅表现为被欺骗买方的数量,还表现为将可能进行的高水平交易驱逐出市场。在我们的模型中,通过以平均满意程度作为交易的概率,体现了诚信的代价。另外,通过引入反馈机制,在模型中比较了两种市场机制下的市场状态。买方反馈的交易满意度信息,可以被认为是对市场的评价,而这种信息提供机制反映了买方试图消除信息不对称的努力。如果存在公平的评价机制,那么市场将有序地、高效地运转。实际上,二手车市场已经渐渐地建立了评价机制,离散的买卖交易被大的商务机构代理。虽然存在代理会增加交易的环节,却保证了交易的效用,保证了最小的不诚实代价。阿克洛夫教授在论文中也提到了类似商人的出现,这类商人不但需要具有分辨汽车质量的能力,还必须能够计算什么样的价格水平使得他们可以在收购旧车和卖出旧车的价格差异中获益。模型反馈机制的设计也正是出于这种考虑。模型的结果也表明,存在买方评价反馈时市场出现分化,如果改变市场容量不变的前提假设,而允许买方挑选诚信度较高的市场进入,那么很明显像 m_2 那样存在大量欺诈的市场将会消失,整个二手车市场会更加有序和高效。

二、ASPEN 的 Swarm 模型

(一) 模型介绍

ASPEN 是由美国 Sandia 国家实验室开发完成的关于美国经济的模拟系统,国内媒体已经有多次报道,引起了学术界的关注。其建模的主要方法是所谓的多主体(Multi-Agent)方法,并且在 Agent 的实现上采取了与 CAS 理论非常接近的方法——为 Agent 赋予适应性。

以往对国家的经济情况进行建模的方法主要是建立宏观模型,而 ASPEN 所采用的建模方法与以往的建模方法最基本的区别在于:ASPEN 模型中所观察或预测的各种经济指标拥有实在的微观基础,在 Multi-Agent 方法中,经济系统里的每一个决策者——家庭、企业、政府、银行等都在模拟系统中有所反

映。而这些决策者在模拟系统中的决策行为是按照适应性学习的方法获得的，与现实生活中的决策机制是一致的。

如图 5—8 所示，ASPEN 中包含了家庭、企业、政府、银行、联邦储备、金融市场等多类 Agent，这些 Agent 在劳动力市场、产品市场、债券市场和贷款市场上分别发生雇用和被雇用、产品需求和提供、债券买卖和借款贷款等行为。而企业在制定产品价格，银行在决定贷款利率时都采用了遗传算法分类学习系统（GALCS），使得这些决策行为更加符合这些 Agent 在现实生活中的原型。

ASPEN 运行于一个大规模的并行计算环境下，模型中的各个 Agent 按照一定的原则分布在不同的主机上，通过高速的网络环境进行消息通讯。因此，ASPEN 中的 Agent 的个数可以不受单机计算条件的限制。

中国人民大学经济科学实验室对 ASPEN 系统进行了分析和研究，并使用 Swarm 对其进行重建。

（二）模型中的各类主体

经济环境类似，模型中的经济环境包括了如下成员：生产者——各类制造商，消费者——主要是家庭，政策决策者——政府，金融机构——银行，金融管理机构——联邦储备局。上述成员在模型中都有对应的 Agent 加以模拟。具体地，模型中描绘了上述经济成员在产品市场、劳动力市场、贷款市场和债券市场上的各种行为，如图 5—8 所示，各个 Agent 的具体说明如下。

1. 家庭

家庭是我们模型中数量最多的一类 Agent。对于一个家庭来说，其收入的主要来源是被雇用后得到的工资收入。雇主是前述四种企业消费品制造商、银行、房地产商、资本商品制造商或政府部门之一。对于一个家庭来说，如果处于失业状态，则政府会支付福利金。福利金的金额由家庭的人口数决定。对于年长的市民来说，可以得到社会保险金。家庭的其他收入还包括了债券利息、存款利息和企业利润的分配（参见消费品制造商）。对于上述各项收入，家庭按照单一税制交税。

家庭的消费包括了如下四个部分：食品、其他非耐用消费品、与交通和住宿相关的商品或服务。在我们的模型中，Agent 对消费品的需求决策与常规的方法不同，这里没有一个在可行性约束条件下的效益最大化函数，而是采用了模拟的技术和合理的假设。

每天，家庭对食品的需求估计取决于家庭的人口数。一旦需求的数量决定了，家庭会寻找一家合适的食品公司采购。寻找的过程是这样的：首先，各个

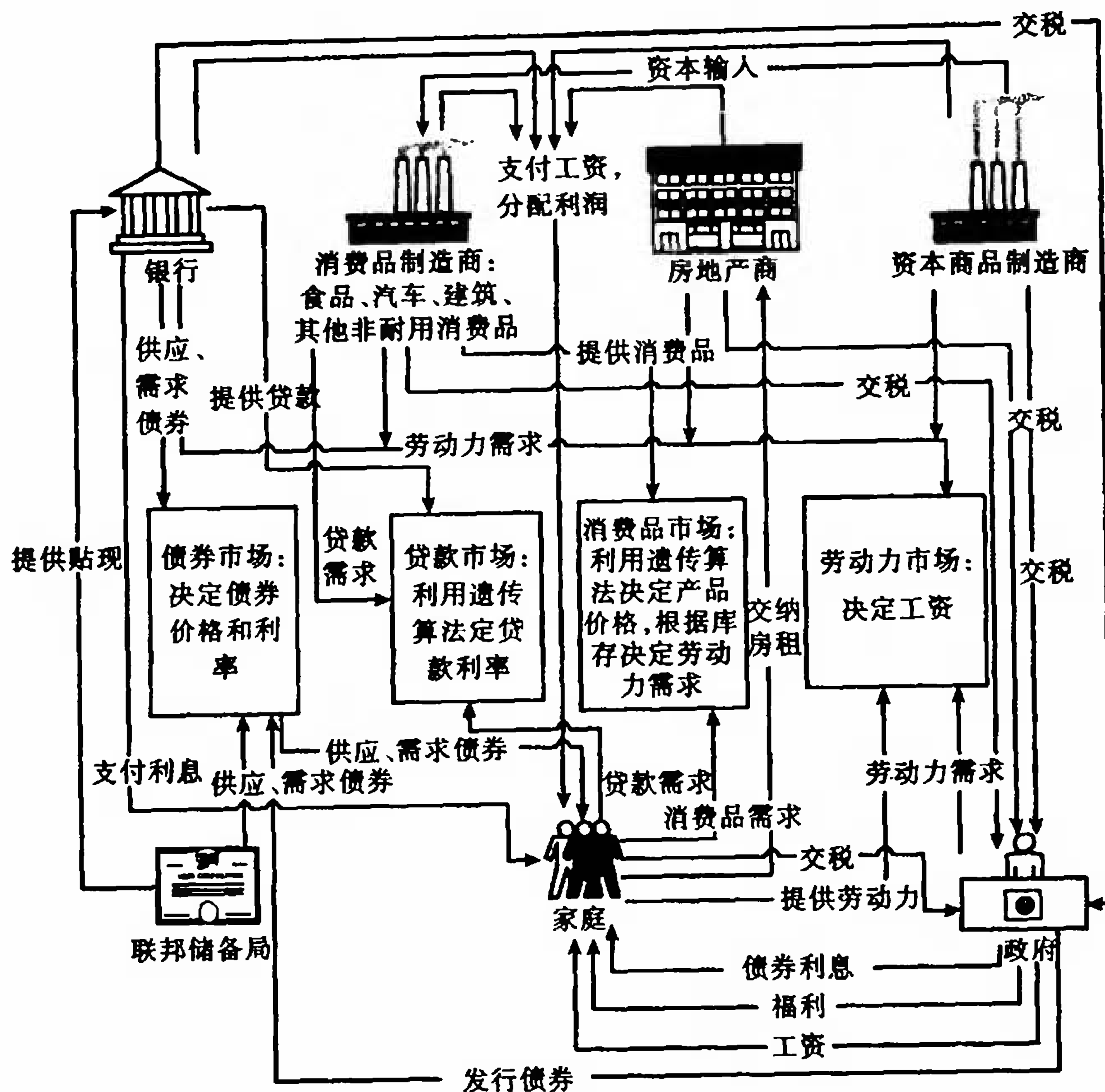


图 5—8 Agent 之间的交互关系

食品公司每天报出自己的单位商品价格，家庭参考各个食品公司的价格列表，假设公司 f 的报价是 $p(f)$ ，则家庭从该公司购买食品的概率是： $k \times p(f)^{-q}$ ，其中， q 是一个给定的指数参数， k 是用来将概率向量标准化的常数。这意味着 $p(f)$ 相对于其他的食品公司越低，家庭从该食品公司购买食品的可能性就越高。

家庭对于其他非耐用消费品的需求决定过程是类似的，不过其需求量的计算方法有所不同：需求量 = $r \times (\text{家庭收入} - \text{用于购买食品的支出}) / \text{非耐用消费品的平均价格}$ 。这里 r 是一个给定的比例常数。

通常情况下，家庭拥有汽车，因此没有交通方面的需求。但是，每天按照一个给定的概率（来自于统计数字），家庭的汽车可能报废，在这种情况下，家庭将试图购买一辆新的汽车。与购买食品的方式相似，家庭是根据制造商的报价决定从哪一家公司购买汽车。如果银行存款足够多，家庭可能会购买一辆

豪华的汽车，其价格是普通汽车的两倍。否则，家庭会选择一家银行申请汽车贷款。同样，贷款利率最低的银行最有可能被选中。贷款数额应该不超过家庭5年总计收入的10%。贷款的数量决定了购买汽车的数量和类型。因此，家庭对汽车的需求是一个以家庭收入、存款和银行利率为参数的函数。

家庭对住房的需求同对汽车的需求类似。在初始状态下，每个家庭可能自己拥有住房也可能从房地产商那里租房。如果是租房，房客每天将收入的一个给定比例作为房租上缴。同时，依据一个概率，这些房客每天可能产生购买住房的愿望。而已经拥有住房的家庭每天依据另一个概率（与债券价格相关）产生改善住房的愿望。这些房客或房主会选择一家建筑商建造住房，同时会选择一家银行申请抵押贷款。选择的方法依然是根据建筑上提供的价格和银行的贷款利率。

在消费上述四种消费品和服务之外，家庭收入的剩余部分按如下方式分配：(a) 持有一部分现金；(b) 存入银行；(c) 投资——买卖债券。

每天家庭都要保证手头持有固定数量的现金，多余部分则按照比例存入银行和用于投资。

每90天，家庭可能将存款从一家银行转到另一家银行，存款利率高的银行可能吸引到更多的储户。

2. 公司

模型中的四种消费品制造公司都是利用资本和劳动力制造商品。公司的生产函数表达为：

$$y = cK^aL^b$$

式中， y 表示公司一天的产量；

K 表示公司拥有的机器数；

L 表示公司的雇员数；

a, b, c 是给定的常数，对于不同的产业有着不同的数值。

公司可以通过改变 K 和 L 的值来调整产量。每年公司可以申请商业贷款用于购买一台新的机器（增加 K ）。公司通过权衡增加的产量与购买机器的费用以及贷款费用来决定是否申请贷款。另外，公司每天都可能解雇雇员或雇用更多的雇员。公司比较最近平均日需求量和当前的库存量，如果库存与需求的差额小于一个给定的常数，公司提供就业机会雇用雇员，如果该差额大于一个给定的常数，公司则裁员限产。

在现有的模型中，对工资的设置比较简单，所有的公司（不分产业）对所

有的雇员（不分教育背景和职务）提供相同水平的工资。

我们的模型中利用 GALCS 模拟企业指定产品价格的过程。每天，企业对如下四个趋势量进行判断：(a) 产品的价格最近是上升了还是下降了；(b) 最近的销售量是上升了还是下降了；(c) 最近利润是增加了还是减少了；(d) 本公司的价格是高于还是低于该产品的市场平均价格。显然，根据上述四种趋势的判断，企业可能处于的状态共计 16 种。

GALCS 对于每一种状态赋予一个概率向量 (p^D, p^I, p^C) ，其中： p^D 表示下一次企业处于该种状态时采取降价措施的概率； p^I 表示采取涨价措施的概率； p^C 表示保持价格不变措施的概率；

注意每次降价或涨价的幅度是一个给定的常数。

公司每天判断自己所进入的一种状态，根据对应的概率向量随机决定如何改变价格。然后，公司 Agent 根据价格的改变对利润的影响决定如何调整概率向量。例如，在某一特定时间状态 2 所对应的概率向量为 $(0.1, 0.6, 0.3)$ ，假设公司此时进入状态 2，此时生成一个随机数表明采用涨价措施。如果后来的事实证明涨价导致了利润下降，概率向量将被调整为 $(0.15, 0.5, 0.35)$ 。于是，模型就模拟了公司价格决策的学习过程。Agent 学习到在状态 2 下涨价是错误的。作为对错误决定的一个反应，Agent 减少在状态 2 下涨价的概率。当公司再次进入状态 2 时，采取涨价措施的可能性会变小。

最后，公司需要根据利润额向政府交利润税，根据工资总额交纳社会保险税。对于税后利润的分配，在模型里依据一般均衡模型 (Varian, 1978, p163) 的思想，利润被平均分配到整个经济环境中的每个家庭。

3. 银行

模型中的银行 Agent 完成以下 4 种功能：(a) 管理家庭在银行的存款户头；(b) 买卖政府发行的债券；(c) 贷款；(d) 雇用少量的雇员。

如前所述，家庭每 90 天可能会将存款从一个银行转移到另一个银行。每天银行将存款利率定为债券收益率的 $4/5$ 。因此，在目前的模型里，所有银行的存款利率是一致的，因此每一个银行的存款客户数是大致相同的。

每天银行必须保证一定的储备金（大约是存款总额的 4%），如果储备金额高于这个比例，银行将多余的部分用于购买债券。如果银行的现金资产达不到这个比例，银行不仅要卖出债券，而且要向联邦储备局 Agent 申请贴现。

银行处理贷款业务时，贷款利率由两部分组成的：一部分是由债券价格和银行缺省的贷款利率决定的；另一部分则是由 GALCS 决定的。银行决定贷款利率的 GALCS 算法与公司定价的算法是类似的，银行的贷款利率对应于公司

的产品价格，银行的贷款总额对应于公司的销售总额。一旦接收到贷款申请，银行会考察：(a) 贷款数量相对于申请者的收入来说是否过高；(b) 最近贷款利率是否过高；(c) 申请者是否已经申请过一笔贷款并且尚未还清。如果上述任何一项条件满足，则银行拒绝该项贷款申请。

最后，银行雇用少量的雇员，雇员数与银行总资产成比例。替银行业交纳收入税和社会保险税。

4. 政府

每天模型中的政府 Agent 从家庭、公司、银行那里征集各项税款（收入税、销售税、社会保险税），向失业者和年长者支付各种补助，对于以前发行的债券，政府需要支付利息。政府还要雇用人口总数的 25% 作为国家公务人员，为他们支付工资。政府完成了这些日常工作后，会核算收入和支出的差额，如果出现赤字，政府就通过发行债券进行弥补。在这个模型里，债券没有到期日，每年政府为每单位的债券支付 0.05 元的利息。初始的债券价格定为 1 元，缺省收益率为 0.05。但是，债券的价格不是一成不变的，债券的价格在债券市场上随需求和供给的变化而浮动。通过调整税率和政府的花费情况，模型可以模拟政府执行扩张性的或紧缩性的货币政策。

5. 债券市场

如前所述，政府、家庭和银行每天都要分别决策各自要发行、购买、卖出多少债券。所有这些决策都被发送到一个特殊的 Agent “债券市场” 上。市场根据各个 Agent 的决策计算债券卖方和买方的数额差距，并将结果发送到联邦储备局 Agent，以供联邦储备局执行扩张性的、紧缩性的或稳定的货币政策时使用（参见联邦储备局 Agent）。联邦储备局会根据具体情况决定发行、购买或卖出债券。

当所有的债券决策都被发送到债券市场 Agent 后（包括联邦储备局的债券决策），市场会根据需求和供给的差额调整债券价格。假设，要求购买债券的数量多于要求卖出债券的数量，这意味着买方的货币值多于卖方的货币值。在这种情况下，市场满足所有的卖方请求，对于所有的买方请求满足一个相同的比例（即卖方总额/买方总额），同时债券价格上升。反之，如果要求卖出债券的数量多于要求购买债券的数量，这意味着卖方的货币值多于买方的货币值。在这种情况下，市场满足所有的买方请求，对于所有的卖方请求满足一个相同的比例（即买方总额/卖方总额），同时债券价格下降。

6. 联邦储备局

模型中的联邦储备局 Agent 执行的许多功能就是现实生活中美联储完成

的功能。首先，如果一家银行不能满足对保证金的需求，联邦储备局根据给定的贴现率为银行提供贴现。其次，如果政府发行了债券而无人购买时，由联邦储备局统一收购这些债券。最后，联邦储备局可以根据债券市场提供的债券供需信息，实现扩张性的、紧缩性的或稳定的货币政策。如果联邦储备局执行的是扩张性货币政策，同时债券市场上卖方订单多于买方，此时，联邦储备局向债券市场提出购买请求；反之，如果联邦储备局执行的是紧缩性货币政策，同时债券市场上买方订单多于卖方，此时，联邦储备局向债券市场提出卖出请求；最后，如果联邦储备局执行的是稳定性货币政策，此时联邦储备局向债券市场提出购买或卖出请求以保证债券价格的恒定。

模型的用户可以在开始时选择执行扩张性、紧缩性、稳定的货币政策，或者选择不执行任何货币政策。

7. 房地产商和资本商品制造商

房地产商 Agent 从房客那里征收房租，为自己的雇员支付工资。房地产商的雇员数与房客总数成比例。资本商品制造商 Agent 为消费品制造商生产机器（资本商品），它也雇用一部分劳动力并支付工资；雇员的数量是由订单数决定的。上述两个 Agent 都不是真正意义上的公司，因为其价格是固定的并且没有竞争者。但是，这两个 Agent 都要盈利、交税，并且按照与其他公司 Agent 相同的方式将税后利润分配到经济环境中的所有家庭。

(三) 模型的实现

这里我们用统一建模语言（UML）中的类图描述模型所涉及的 Agent 之间的继承关系，如图 5—9 所示。其中 SWObject 是一个抽象类，作为所有对象的根类，仅仅封装了对象的标识及相关操作。余下各类见表 5—1。

表 5—1 Agent 类的描述

类名	Agent	实例数	备注
SWHousehold	家庭	≥ 1000	
SWGoverment	政府	1	
SWBank	银行	2	
SWFederalReserve	联邦储备局	1	
SWFinancialMarket	债券市场	1	
SWFirm	公司	0	封装了雇用、生产、销售和价格决策的方法
SWFirmFood	食品制造商	3	派生自 SWFirm
SWFirmAuto	汽车制造商	2	派生自 SWFirm

续前表

类名	Agent	实例数	备注
SWFirmOthers	其他非耐用消费品制造商	2	派生自 SWFirm
SWFirmConstruction	建筑商	2	派生自 SWFirm
SWFirmRealty	房地产商	1	派生自 SWFirm
SWFirmMachine	资本商品制造商	1	派生自 SWFirm

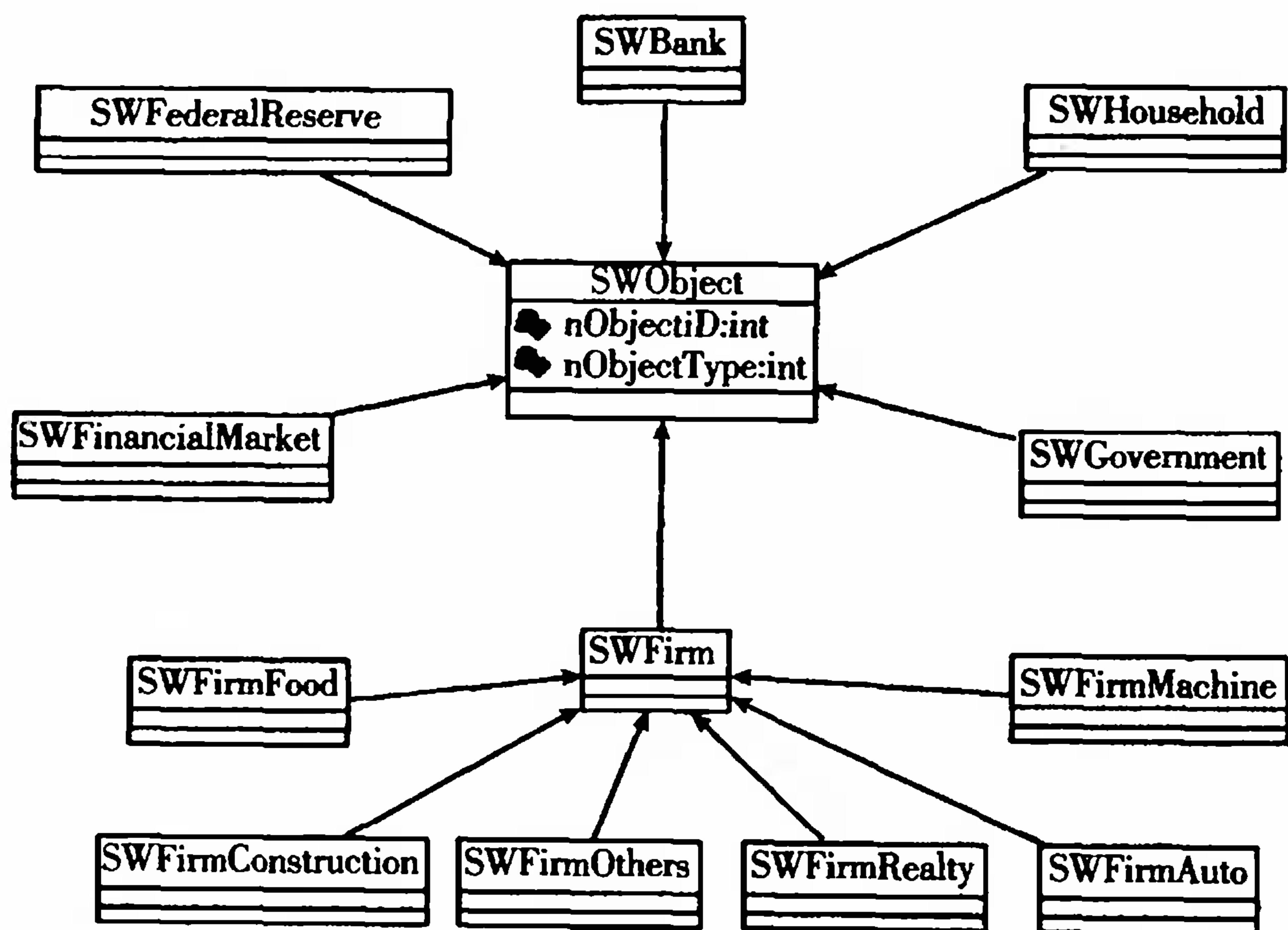


图 5—9 Agent 的继承关系

如前所述，Swarm 采用对 Agent 的行为排列行为表的方式实现对系统中并行交互的模拟过程。在模型的实现过程中我们将每一天分为 13 个时间步骤，在每个步骤里分别实现如表 5—2 中的行为。

表 5—2

Agent 行为的执行顺序

步骤	Agent	行为
1	政府	雇用或解雇雇员
	公司	
	银行	
2	政府	支付工资、保险和福利
	公司	支付工资
	银行	

续前表

步骤	Agent	行为
3	公司	生产商品
4	公司	商品价格决策
	银行	贷款利率决策
5	家庭	家庭每日消费, 获取消费贷款
6	家庭	交税
	银行	
	公司	
7	公司	税后利润的分配
	银行	每月初分配税后利润。日常投资、申请贴现
8	家庭	当日收入盈余的分配、投资
9	政府	计算赤字 (发行债券)
10	债券市场	计算买卖双方的差异 (不包含联邦储备局)
	联邦储备局	根据所执行的货币政策决定购买、出售或发行债券
	债券市场	达成交易, 调整债券价格
11	家庭	每 90 天选择新的存款银行
12	公司	每年第一天执行购买新机器的决策
13	所有	初始化每日参数

原则上, 当一个行为涉及多个 Agent 时, 该行为对应的方法实现在提出行为的 Agent 类中。Swarm 提供了相应的调度机制, 使得模拟过程中上述步骤依次得到执行。为了更真实地模拟这些 Agent 在现实生活中的行为, 对于具有多个实例的 Agent, Swarm 支持按照随机的序列方式调用它们。例如, 对于食品公司来说, 在模型中共有 3 个实例, 每天这 3 个食品公司都会雇用或解雇雇员, 在随机调度方式下, 虽然雇用和解雇过程是串行实现的, 但每次调度的顺序都不相同, 这就避免了模拟过程中容易出现的各种极端情况 (有的公司总能雇用到工人而有的公司总也雇用不到)。

Swarm 实现的模型与 ASPEN 原模型系统对比, 如表 5—3 所示。

表 5—3 与原系统的对比

对比	ASPEN	Our Model
建模方法	Multi-agent	Multi-agent
运行环境	并行环境	单机环境
操作系统	并行操作系统	Solaris、Linux、AIX、Windows 9x/NT
开发工具	专用开发工具	自由软件 Swarm
决策手段	GALCS	GALCS
调度机制	网络消息传输机制	行为序列表

(四) 运行结果的初步分析

通过模型的运行，可以观察到经济生活中一些经济现象的产生。首先，可以观察到消费的波动现象，如图 5—10 所示。

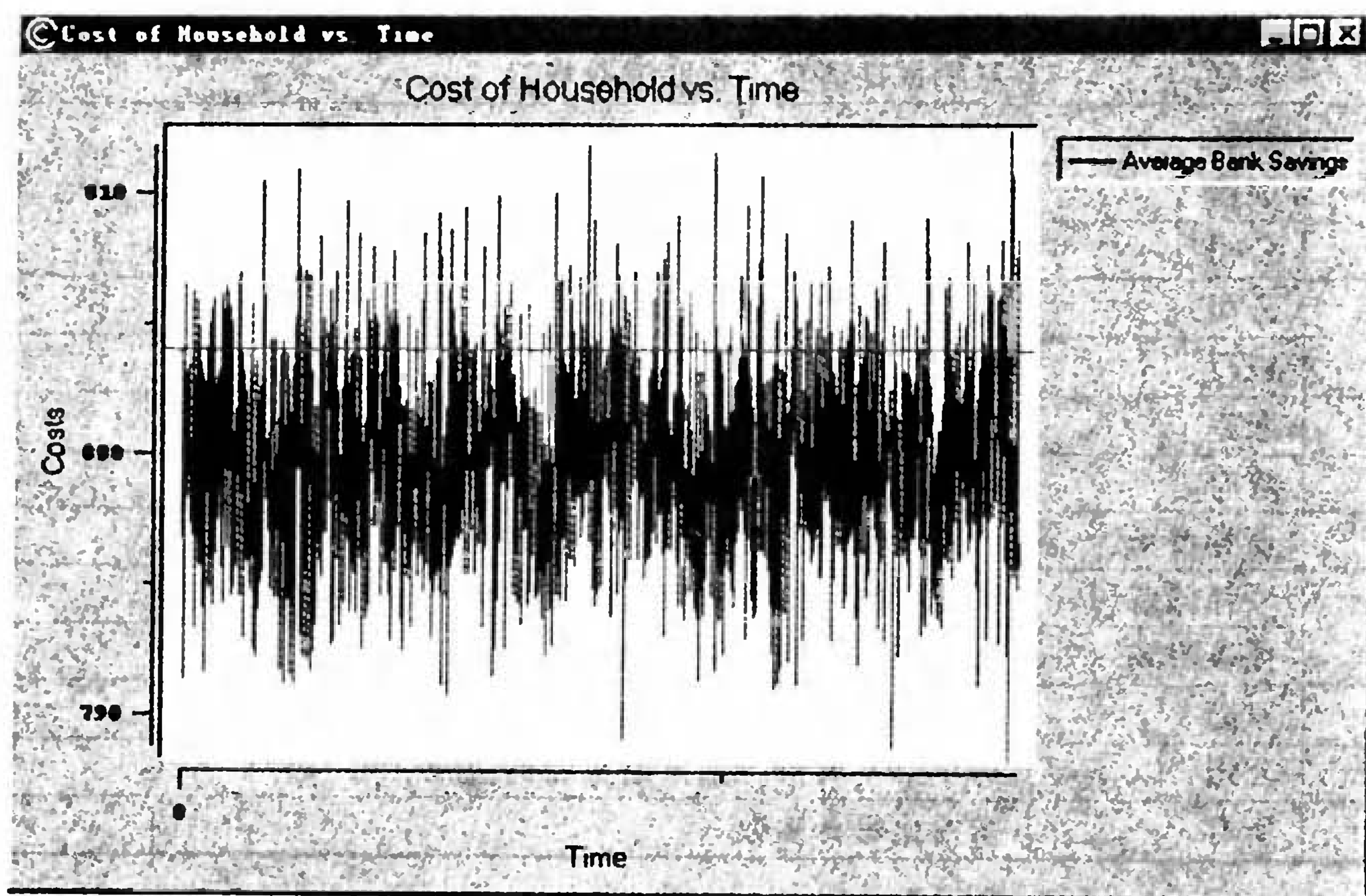


图 5—10 家庭的平均消费数额

家庭的平均消费数额是指模型中所有家庭每日用于消费的平均金额，从图中可以看到消费呈现出一定的周期性，这表明了家庭每日消费支出与市场供给的互动关系。

根据微观经济学的传统分析方法，假设在某一产业中有两个处于竞争地位的公司，在本模型中可以用两个非耐用消费品公司示例。其中公司 A 的期望收益可以表达为：

$$\Pi_1 = (p_1 - C) \times \left(\frac{p_1^{-q}}{(p_1^{-q} + p_2^{-q})} \right) \times a$$

式中， p_1 ， p_2 表示两个公司的产品单价；

q 表示需求指数；

C 表示单位成本；

a 表示市场需求常量。

可以证明，在两人博弈的情况下，如果市场需求为固定量，当双方的定价

为： $p_1 = p_2 = qC/(q-2)$ 时，达到一般均衡。实际上，在我们运行模型的过程中，公司的 Agent 通过 GALCS 算法，逐渐演化得到的价格与上述公式相符合，从而得到了按照博弈论预期的结果。

三、国会山保姆公司模型

(一) 模型介绍

在 P. 克鲁格曼 (Paul Krugman) 的一本近作《萧条经济学的回归》中，作者通过一个故事贯穿全书，这个故事出现在 Jone Sweeney 和 Richard Swceney 在 1978 年发表的一篇文章《货币政策和大国会山保姆公司危机》。作者通过国会山保姆公司这个缩小的经济实体来帮助人们认识经济衰退如何产生，以及如何对付衰退。受作者的启发，我们想到用计算机建模来模拟这件事情，从而为理解真实经济的兴衰提供关键的线索。

不要小看这个题目，这是一件很严肃的事情。因为认识一个复杂系统的惟一方法是利用模型，即将其简化到可以帮助你理解该体制如何运作的程度。

故事是这样的：20 世纪 70 年代，Sweeney 夫妇是一家保姆合作社的会员。这是一些主要在美国国会工作的年轻夫妇成立的组织，他们愿意彼此之间充当保姆。这家公司较大，有 150 对夫妇，与其他的机构一样，国会山保姆公司通过印刷临时票券来解决问题：每做一个小时的保姆工作（即照顾别人的孩子）可以得到一个单位的票券，反过来，请别人照顾孩子，则要付给别人一张票券。这套制度设计得很科学，它可以自动保证每对夫妇照顾别人孩子的时间，与别人照顾自己孩子的时间相等。（模型的参数录入窗口见图 5—11。）

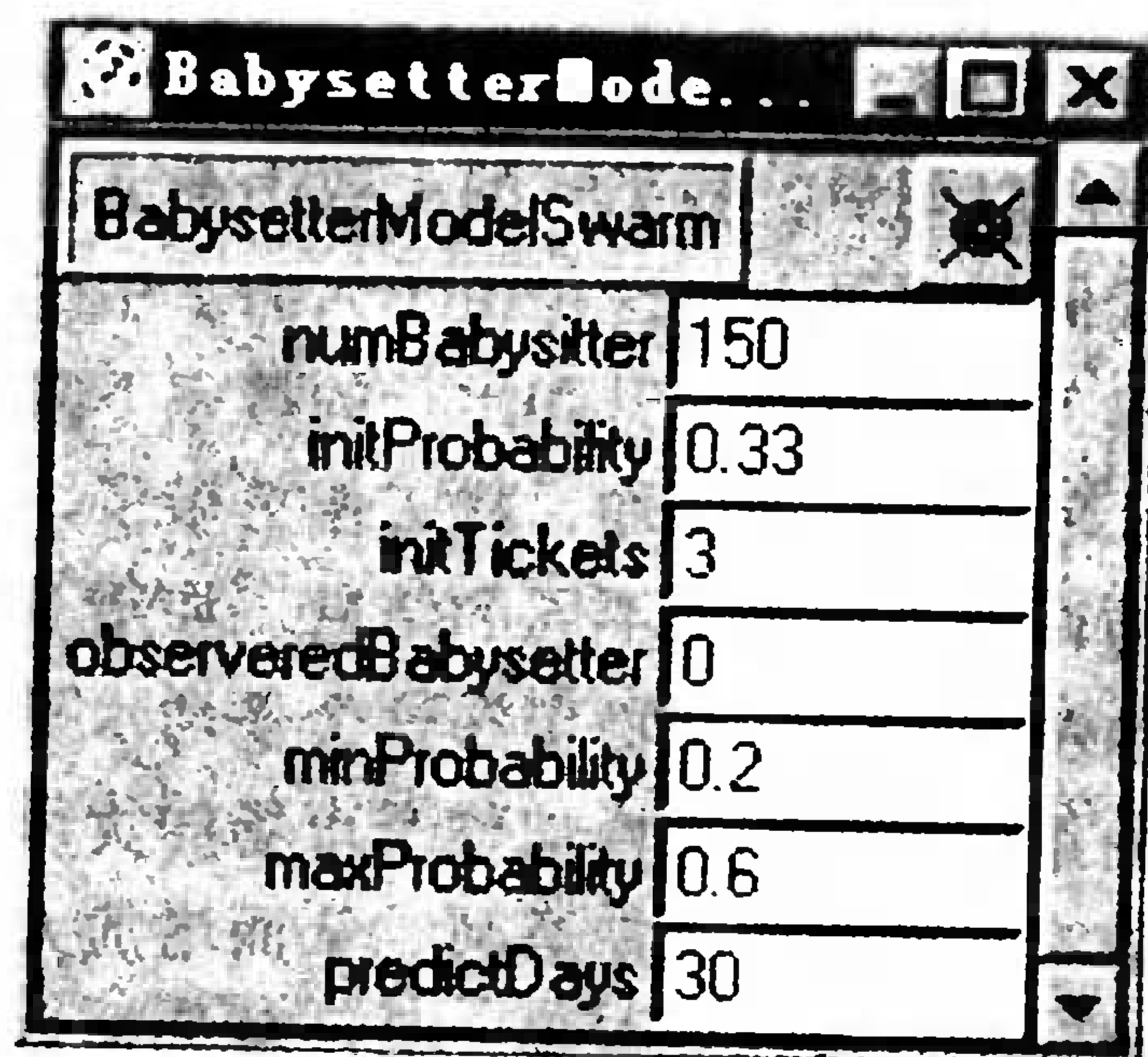


图 5—11

但事情并不那么简单，人们发现这个制度需要相当数量的票券来流通。连续几个晚上空闲、又没有马上外出计划的夫妇，要为未来打算积蓄一些票券，这种积蓄行为意味着其他人储蓄的票券会相应减少。时间一长，每对夫妇都要积蓄足够的票券，以方便自己外出时可以使用。而国会山保姆公司印制票券的过程很复杂。这里面的具体细节不重要，关键是到一定时间以后，流通中的票券就不够了，少到无法满足会员需求的程度了。

这个结果很突然，那些觉得自己积蓄的票券不够的夫妇，都急于帮别人照顾孩子，自己不愿意外出。夫妇们不愿意外出则意味着保姆工作越来越少；这反过来又使得夫妇们因得不到足够的票券而更加不愿意外出，如此循环，保姆的工作则更少了……于是，保姆公司的活动进入了衰退期。

如果将保姆公司这个缩小的经济体扩大到一个真实的社会，将票券比做货币，那么这个故事就有它很强的经济学含义。我们希望通过计算机模拟来理解这个故事最主要的两个含义：一是衰退是如何发生的；另一个是如何对付衰退。

（二）模型实现

在模型中，我们设计了 150 个家庭实体和 1 个保姆公司。每个保姆对未来预期的票数为：

$$\text{NumTicket} = p * \text{predictDay}$$

也就是说，当一个保姆手中掌握的票数大于他/她预期的票数时，出行的概率增加，找工作的概率下降；否则，找工作的概率上升，出行的概率下降。

图 5—12 是模型运行的统计。从图中可以看到，刚开始，找工作和出行的人数基本相等。经过一段时间后，找工作的人数逐渐上升，出行的人数急剧下降，最后稳定在一个较低的水平上。这是由于人们手中的平均票数低于预期的票数，因此造成人们找工作的概率上升和出行的概率下降。这样进一步造成劳动力市场的供大于求，使得失业率增加、找工作更难了，最终导致了整个市场的衰退。通过对参数的调整可以得到不同的结果。如图 5—13 所示，可以使出行人数和找工作的人数基本相等，并稳定在这个平均水平。一种调整方式是增加每个保姆手中的初始票数，也就是增加整个市场的货币投放量。这样可以使得人们掌握的平均票数有可能大于预期票数，从而增加人们的消费需求。但同时会造成通货膨胀，引起难以预料的后果。另一种调整方式是减少人们的预期天数。我们知道，人们预期的天数越少，预期的票数也越少。通过完善和健全

贷款制度、保险制度和社会保障金制度，使得人们不必由于对未来预期不理想而攒钱，这也是扩大消费、避免衰退的一个手段。

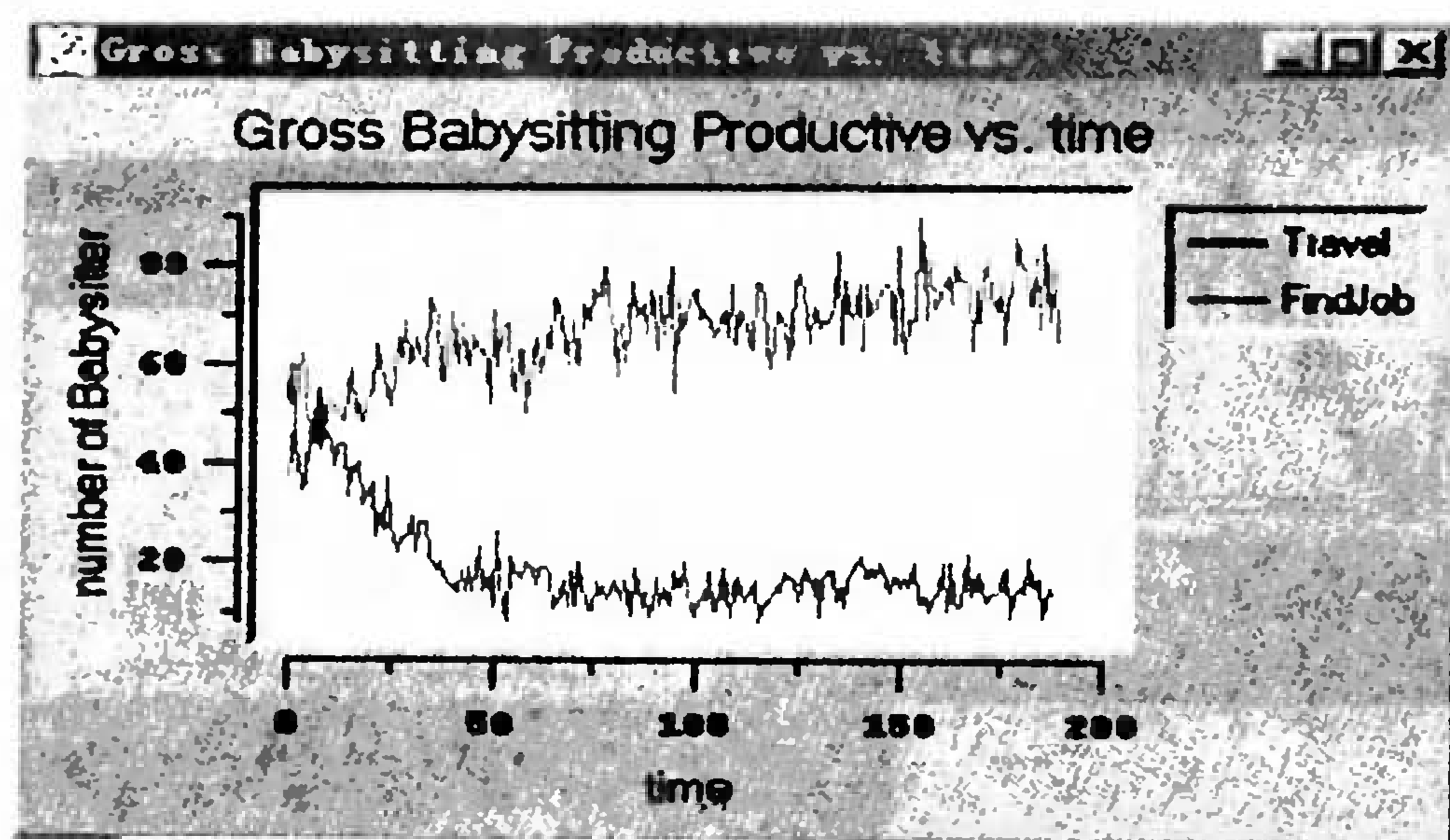


图 5—12

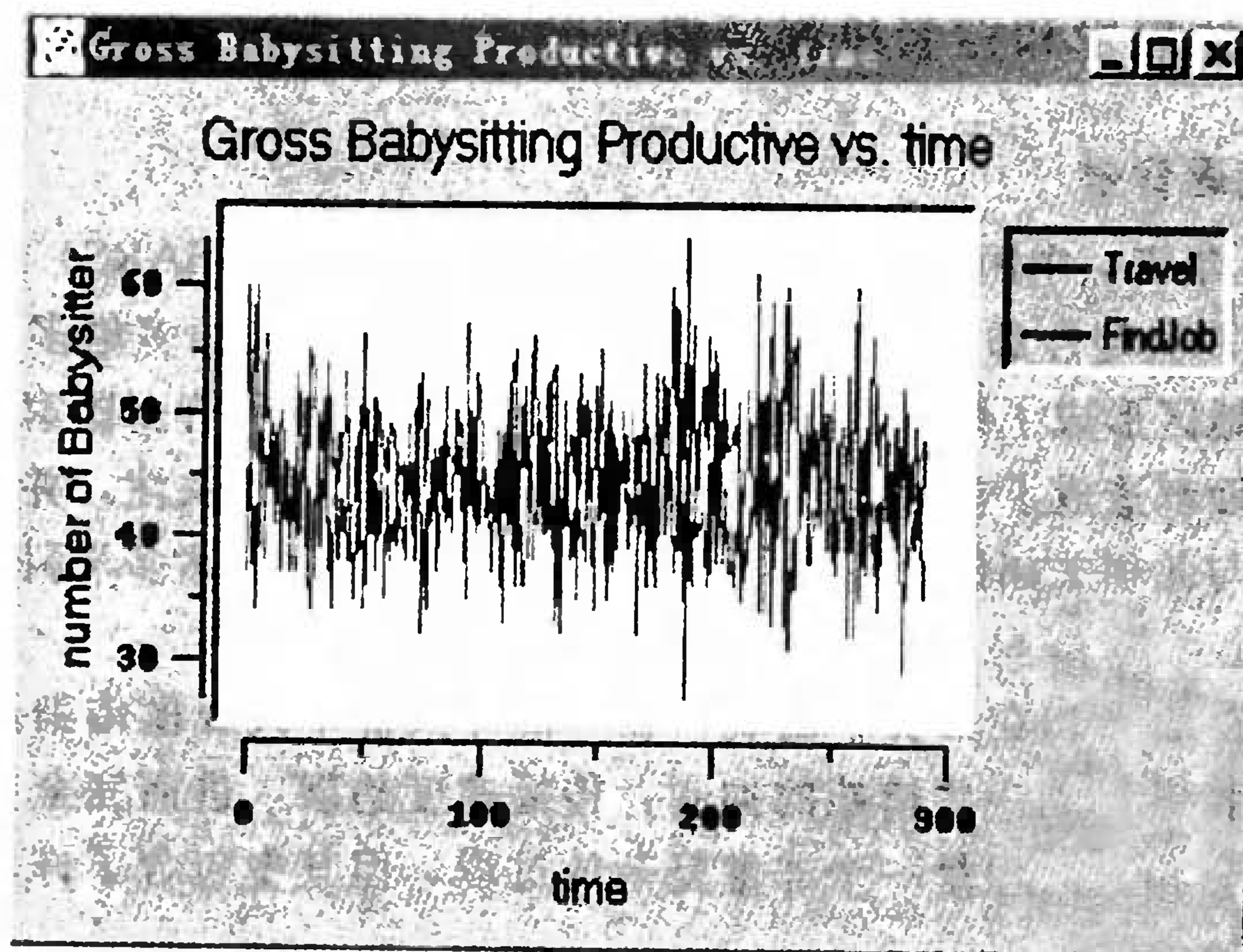


图 5—13

通过这个模型，我们还意外地发现了贫富分化的现象。图 5—14 是在相同参数下，对两个不同的“保姆”的观测结果。为了使模型更加真实，我们给每个“保姆”赋予一个不同的值来表示其竞争力。竞争力越强越容易找到工作。图上方的是一个竞争力较强的“保姆”，其手中掌握的平均票数要大于下方的

那个竞争力较弱的“保姆”。可见，如果不通过税收等调节手段，直接通过市场竞争的话，就容易出现贫富分化的状况。

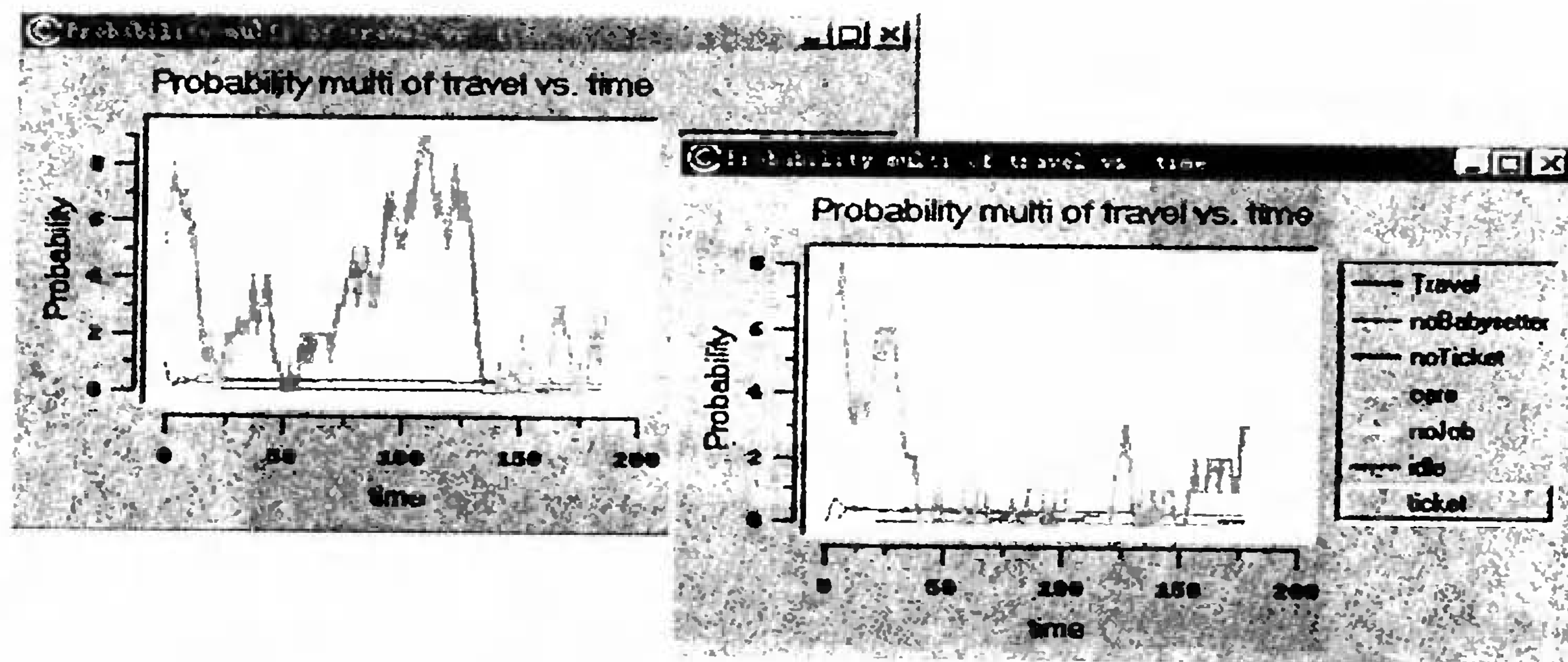


图 5—14 对两个不同“保姆”的观测结果

四、SARS 的爆发和控制机制模拟

(一) 问题背景

从 2002 年底，中国的广东省出现了非典型性肺炎（SARS）的病例，到 2003 年春，非典型性肺炎在香港、北京、山西及加拿大的多伦多、新加坡等一些国家和地区形成了爆发性的流行。疫情的扩展对世界许多国家的经济和社会生活等方面都造成了重大影响，引起了世界范围的广泛关注，并由此引发了许多组织对与此相关如传染病学、传播学、社会心理学等诸多学科领域问题的研究和探索。

一种传染病最初在人类中出现，在一部分人群中大规模传染进而产生爆发性流行，接着受到一些措施的抑制，传播速度趋缓，进而完全受到控制乃至基本消亡，整个过程是一个非常复杂的过程，但其中包含了许多值得关心的问题。

一种传染病爆发有三个因素必不可少：传染源、传播途径和易感人群，三者独特的结合也就构成了特定传染病的特点，但对于一种传染病，尤其是新发的传染病（正是最值得关心的），很难确切地了解这三者之间严格的界定，这就对我们研究一种新发的传染病的爆发过程造成了一定的难度。易感染、有接触、有传染性的个体，全部都是有主动性的个体，他们的行为方式，对于病情的发展具有影响，同时也会随外界情况的变化产生适应性的改变，这也造成了

要研究的问题的复杂性。此外，对传染病爆发的干预和控制措施对传染病发展的影响过程更为复杂。我们可能根据传染病发展的情况采取一些控制措施，前面提到了影响传染病发展的具有主动性的个体，对于控制措施这一外界因素，会产生适应性的变化，这反过来对传染病的发展会产生何种影响呢？针对不同的传染病不同措施的效果可能不同，如何来决定对特定类型的传染病，哪种控制措施的效果最好。回答这些问题可能并不容易，但对于我们无疑是非常重要的。解决了这些问题，有助于合理地制定决策：何时采取措施能够有效地控制传染病的爆发，或者具体在传染病发展的不同阶段采取哪些措施或措施的组合会比较有效。

（二）模型的结构

因为采用基于主体的计算机模拟方法，模型中很重要的一部分就是主体的建立。此模型中考虑的主体是人，具体来说是与有传染能力的人有过接触的“接触者”（当然随着模型的运行，他的状态也会发生变化，可能最初是被感染继而转为发病，后文中将详细介绍）。其中包括主要的属性和方法（这为后面介绍的运行机制提供了基础），具体如下。

`int infect_state` 描述该主体状态，包括的情况有 4 种：接触未被感染、接触被感染还未发病、确诊发病、经过治疗已经康复；

`int touch_num` 反映该主体具体每日平均能接触到的人数，为总体平均日接触人数与下面的活跃变量结合求出；

`double activity_degree` 反映该主体的活跃程度；

`int sepearte_flag` 隔离或就医标志，可能情况有未被隔离、被隔离、已就医。

主体类中主要的方法（函数）就是判断主体的状态，实现根据主体不同的状态在每个时间步（这里是 1 天）做出相应的行动。在下面的运行机制里将详细介绍。

`ModelSwarm` 类中，主要设置了模型中系统级的参数，这些参数可以显示给用户，并可以被修改来实现对不同条件下模型运行结果进行比较研究。这里还设置了每个时间步模型的动作序列。系统级的参数包括：

· `int initInfected` 系统中最初的发病人数；

`double infect_probability` 被接触后可能发病的概率；

`int touchPerson_num` 整体上平均的日接触人数；

`int infectDelay_exp` 被感染到发病的平均时间延迟（潜伏期期望值）；

`int hospitalChange` 描述了改变就医习惯的时机，即系统运行天数满足这

个值后，人从发病到就医的时间间隔将减小；

int hospitalDelay 主体从发病（具有传染能力）到就医的时间间隔；

double seperatePower 隔离力度，大于等于 0 并小于等于 100 的实数，表示了被隔离人数的比重，若此值为 70 时，指 70% 的人被隔离；

int seperateDelay 系统采取隔离措施的时间，描述运行多少天后采取隔离；

double becured_probabilit 接受治疗后的平均治愈率；

int recover_delay 从入院接受治疗到痊愈的平均时间延迟。

对于每个时间步模型的动作将在下面的模型运行机制里详细介绍。

ObserverSwarm 类中实现了对运行结果数据的采集以及显示的工作。在这个模型中主要显示了四组数据随时间变化的折线图：累计发病人数、每日新增发病人数、累计治愈人数和每日新增治愈人数。利用 Swarm 中的图形类库，这些工作都比较方便，这里不详细介绍了。

（三）模型运行机制

下面具体介绍一下该模型是如何运行的。图 5—15 反映了模型中涉及的几个重要的变量是如何相互转化的。

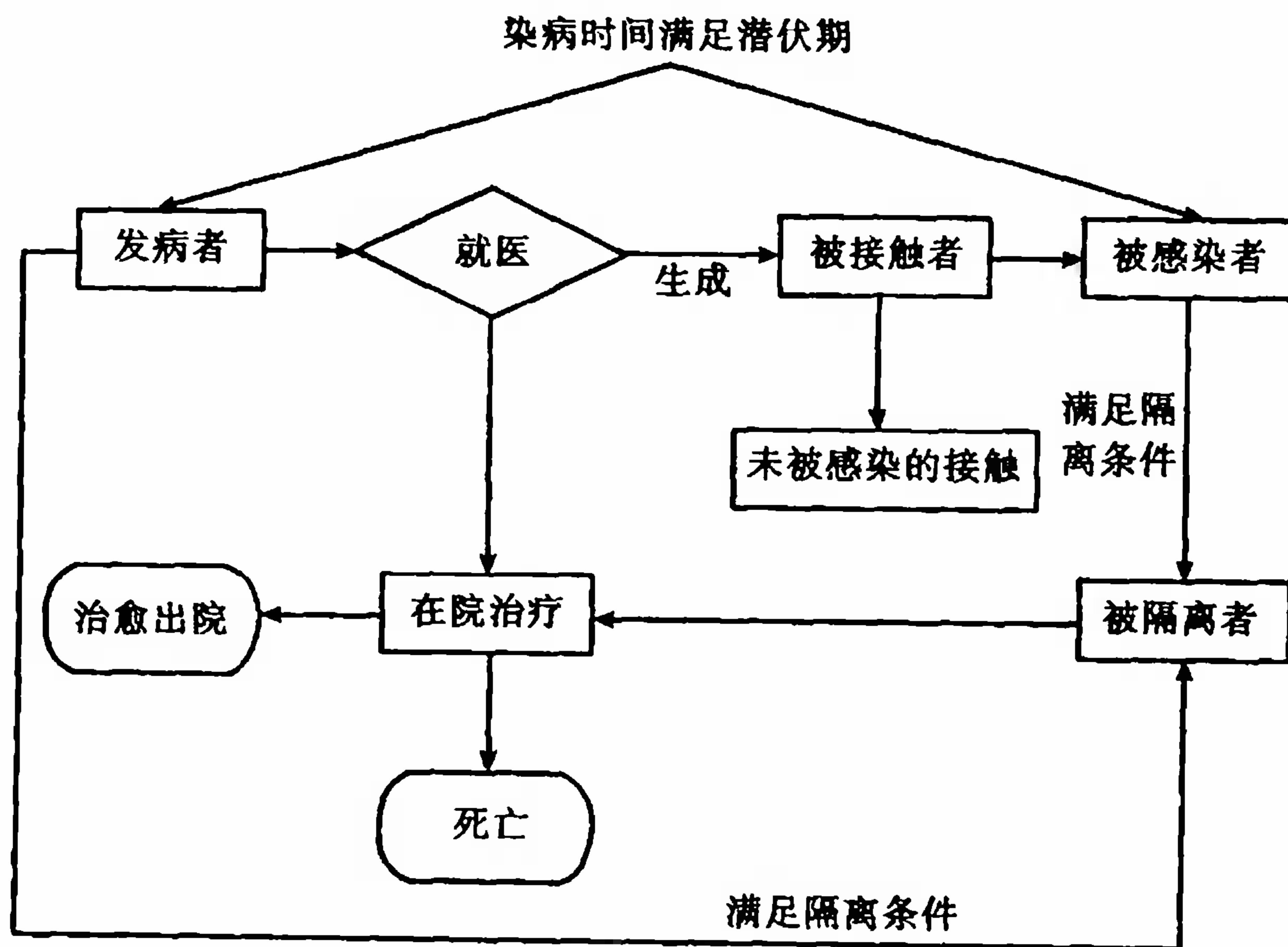


图 5—15 变量间关系图

在前一部分关于模型结构的介绍中，已经列出了系统运行所需要的参数，这反映了这个模型对于现实抽象的取舍。具体来说，目前的模型中所要观察和研究的主要是累计发病人数和每日新增病例数，认为系统中对这两个量有重要影响的因素包括系统中最初具有的染病（即具备传染能力的）人数、每人平均每日接触的人数、被接触后可能会患病的概率，以及患病者从发病到就医之间的时间。考虑对病情的控制因素目前重点在于两方面，一是通过比如对传染病知识的宣传和采取一些对于患者有督促性政策，来缩短患者发病到就医期间的间隔；另一方面就是通过适时采取一定程度的隔离措施。患者就医后以及接受隔离措施后都会影响每日接触的人数（这里设置为接触 0 人），从而控制了传播渠道，最终对病情发展产生影响。这个模型中还考虑了主体两种自适应性的行为对病情发展的影响，一种是通过了解到前一天的新增病例数，来调节自己的活跃程度，即当日新增病例数超过一定范围时，主体会尽量减少外出活动，从而影响每日能接触到的平均人数。另一种是考虑到随着病情的发展，病毒的毒力可能有所下降，同时还会随着人们对病情的认识，可能会提高卫生习惯，采取一些预防措施，从而使接触后染病的概率随时间有所降低。

Swarm 模型是在一个时间序列上运行的，即在每个时间点上执行程序规定的一系列动作，上一部分也已经提到，这部分具体是在 ModelSwarm 类中实现的。根据图 5—16，我们看到每个时间点上模型的运行过程。

执行主体动作的过程图如图 5—17 所示。首先，执行隔离操作，在前面的参数介绍中已经提到过了，模型根据输入的“隔离力度”参数决定当前主体中有多大比例的人会被隔离。被隔离后的主体每日所能接触到的平均人数近似设置为 0（这里与就医后的接触人数一样，主要考虑平均接触的人数很少，保护措施比较强，而且重复的程度很大，随着模型的扩展可能性更大）。这里还做了一项比较重要的工作就是判断主体被隔离的具体时机，只有当该主体受到感染，进入医院或被隔离被发现后，与该主体有过接触的发病者在经过一段时间后才会被发现和隔离，这样考虑是比较符合实际情况的。

前面介绍了这个模型的运行，即模拟现实传染病发展过程的机制，以及一些可能的控制措施发挥作用的机制。在后面的模拟结果分析部分，我们将看到在这一机制下修改某些参数，对于模型运行情况即传染病发展情况的影响。

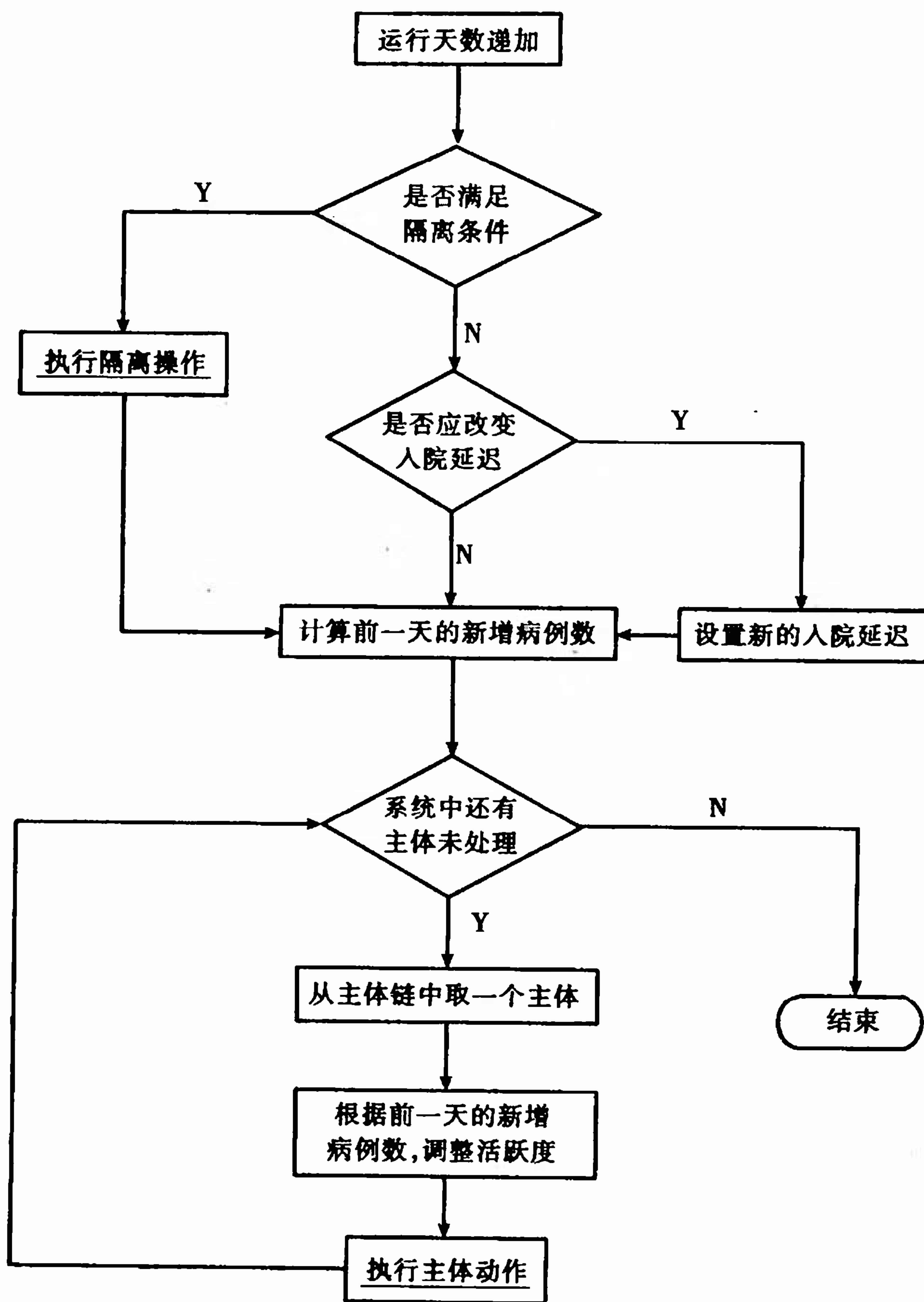


图 5—16 模型动作的程序流

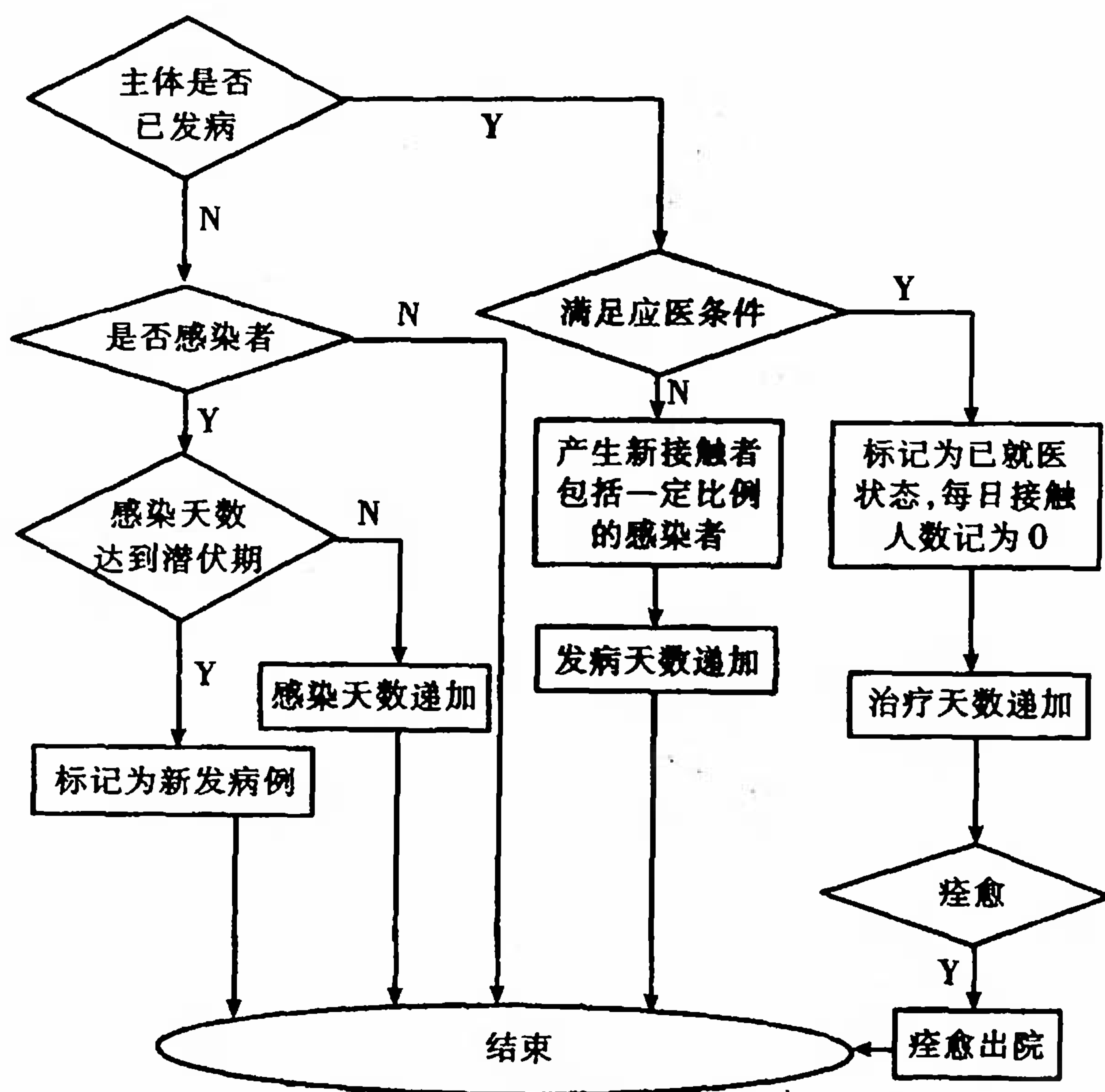


图 5—17 主体动作程序流程图

(三) 模拟的结果及分析

下面是建立模型后进行的几组实验以及对实验结果的分析。通过调整一些参数观看对应的现实因素对于控制 SARS 的影响。这些因素分别是就医的及时性、最初的患者个数、隔离的力度等，下面分别介绍各次对照实验的结果。

1. 及时就医

先来看看及时就医对于控制病情的重要性。下面是我们的一组实验结果，运行参数设置如图 5—18，此时先不考虑隔离因素，即假设没有采取隔离措施，其他机制如前文中介绍。

系统中最初具有感染性（患者）的人数为 1；

最初每人平均每日接触 10 人；

发病潜伏期为 4 天；

最初前 25 天从发病到就医间隔为 3 天，25 天后改为 2 天；

接触后被传染的概率为 0.1。

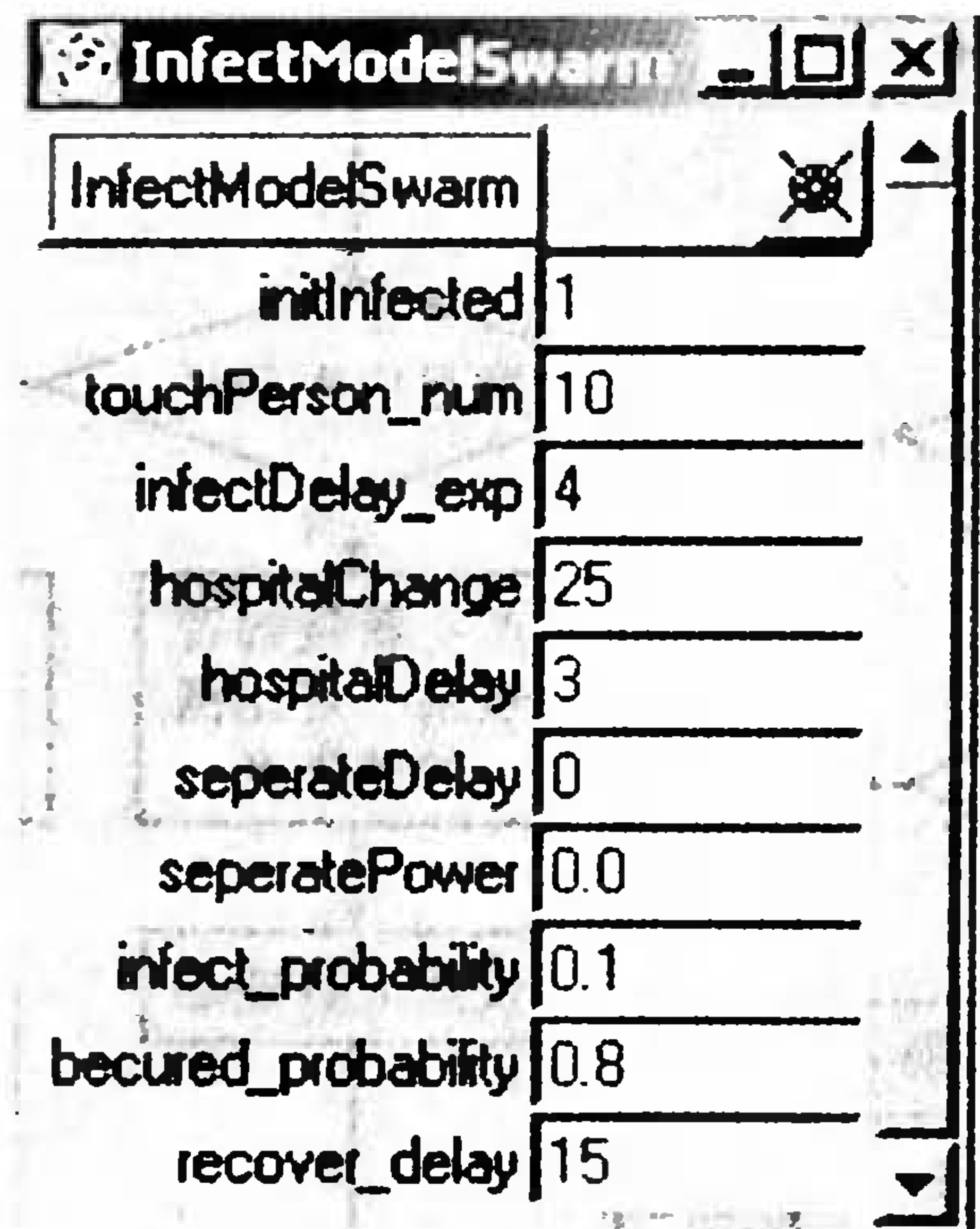


图 5—18

此模型的运行结果，即累计发病人数随时间变化的曲线图和每日新增病例随时间变化的折线图，如图 5—19 和图 5—20 所示。

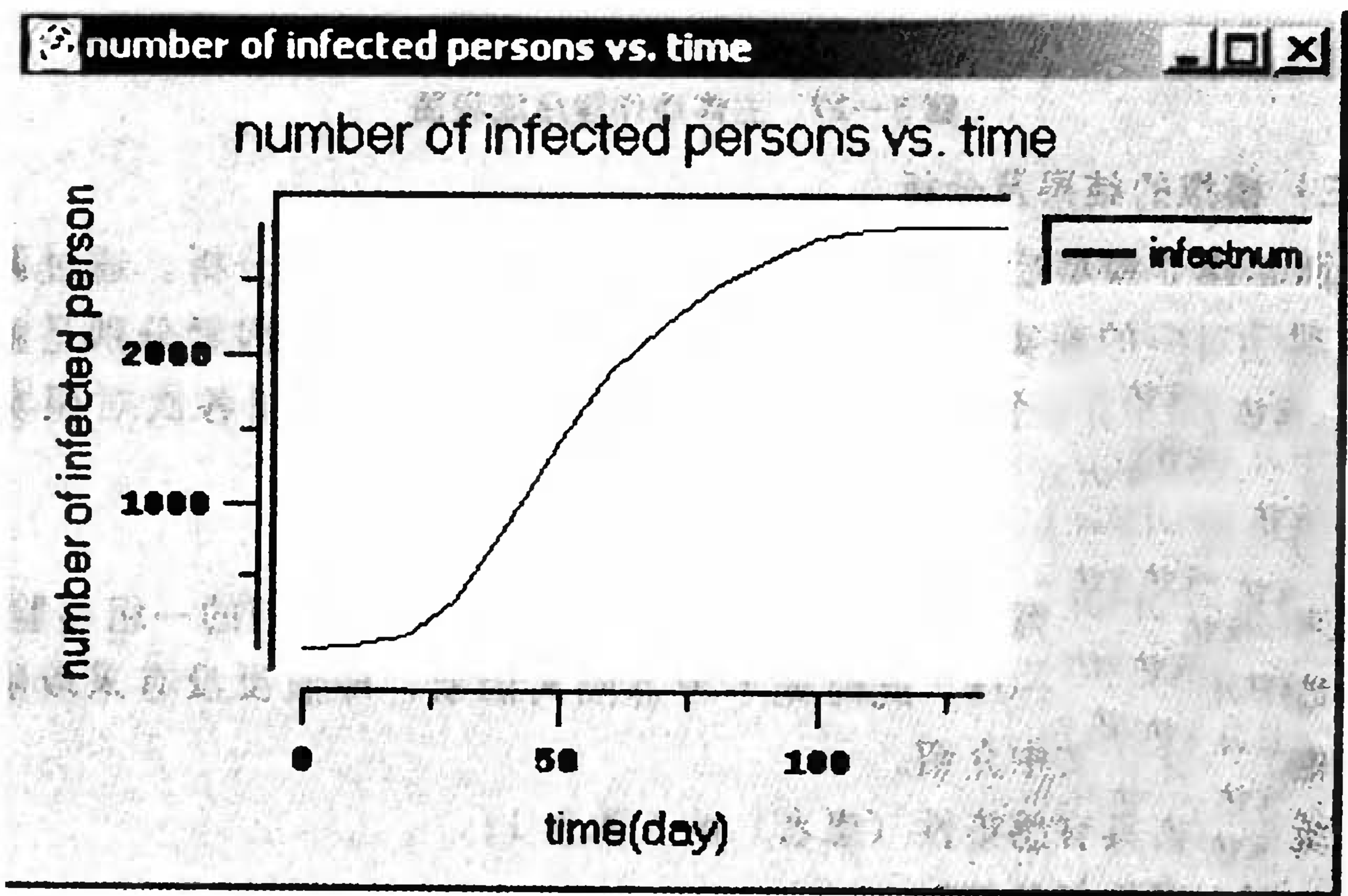


图 5—19 累计发病人数随时间变化的曲线（25 天变化）

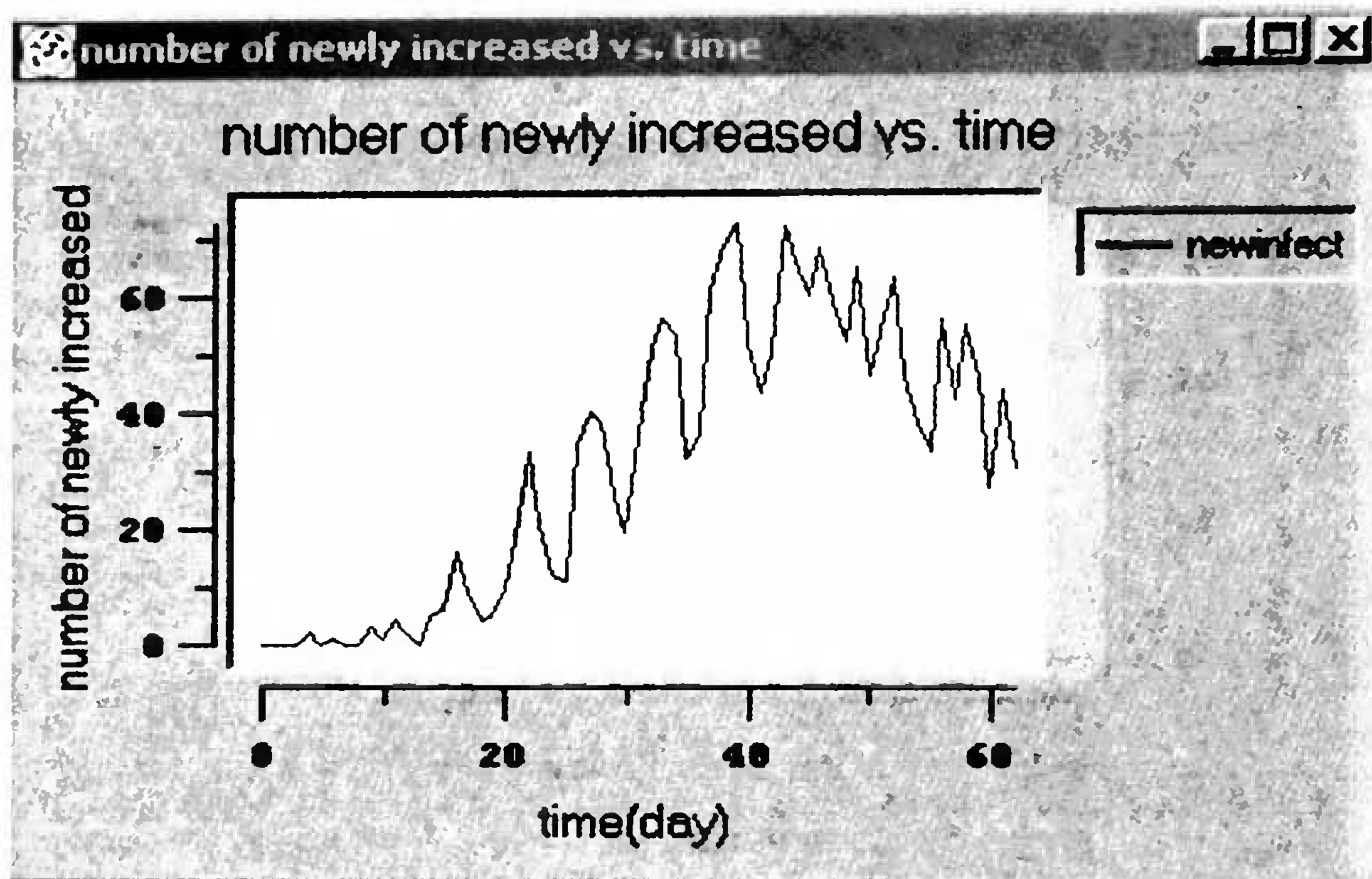


图 5—20 每日新增病例随时间变化的曲线 (25 天变化)

可以看出在只采取了缩短发病到就医间的时间（仅减少了 1 天）的控制方式下，从每日新增病例的曲线中可以看到，虽然采取措施后效果有一定的滞后，但是在 40 天左右到达峰值后基本保持震荡下降的趋势。上面是在系统运行 25 天后发生了就医间隔的改变，若在 35 天后发生这种改变（其他条件完全相同）的两个曲线图如图 5—21 和图 5—22 所示。

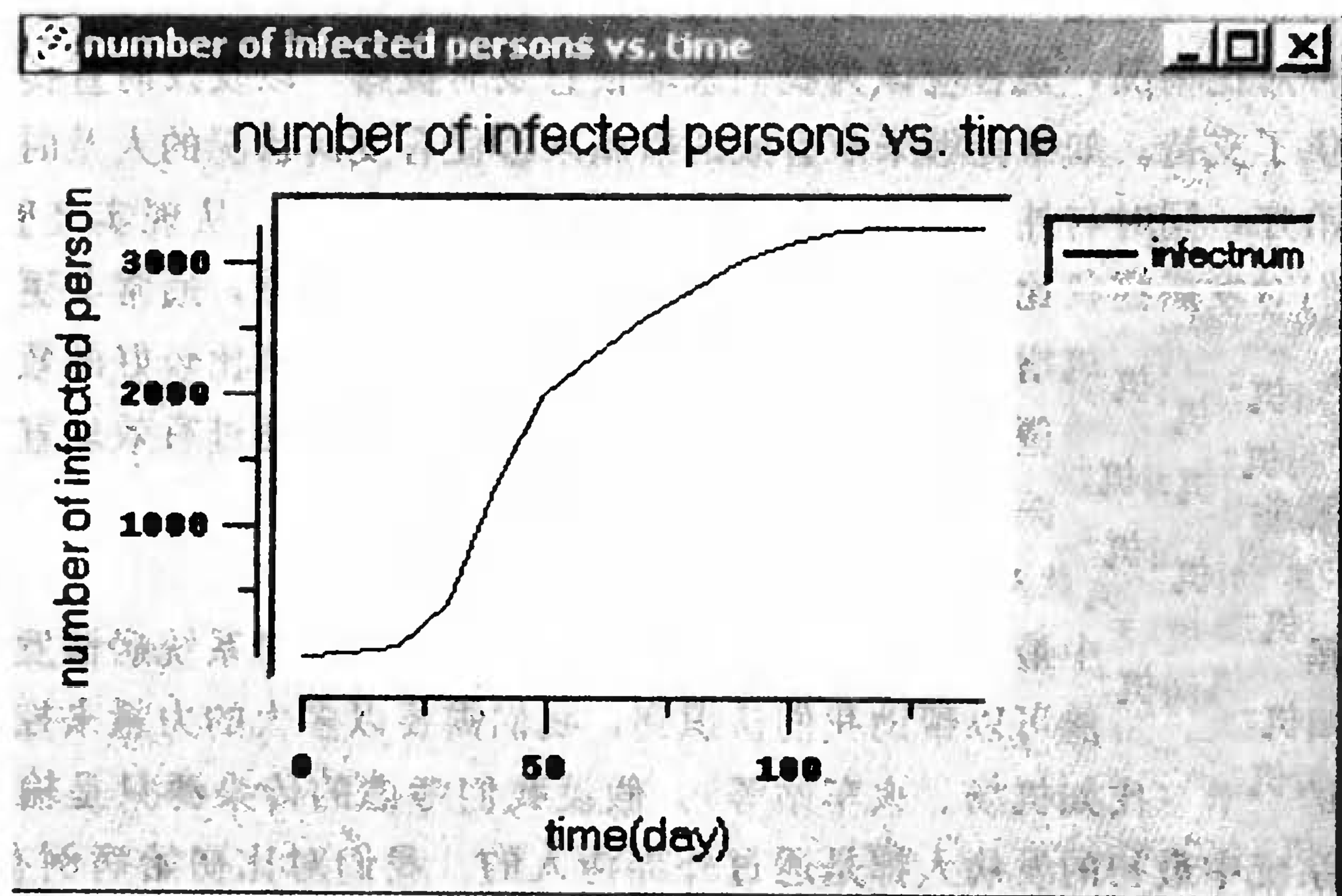


图 5—21 累计发病人数随时间变化的曲线 (35 天变化)

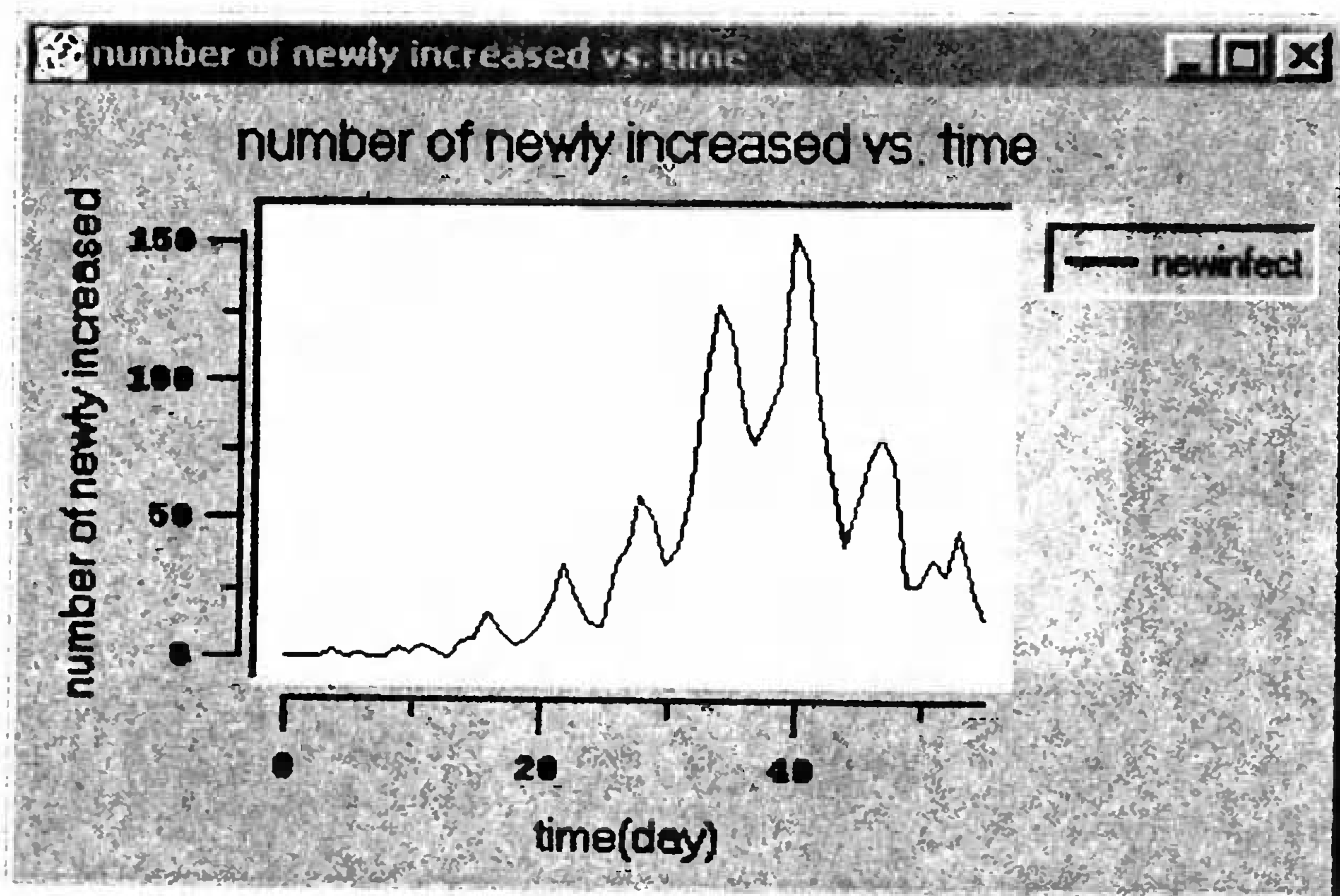


图 5—22 每日新增病例随时间变化曲线 (35 天变化)

可以看出尽管 35 天发生了这种改变, 每日新增病例数也是在 40 天前后达到了稳定, 可这个稳定的值是 100 人以上 (前一种情况中这个值是 60), 而且对比累计病例数第一种情况下 (25 天后改变), 120 天稳定在 2 700 人左右。最终稳定的时间也是在 120 天左右稳定在大约 3 200 人。延期 10 天控制人们从发病到就医的速度, 使最终的稳定值增加了近 500 人。

这种对比情况, 是否应该为我们采取信息及时披露, 以及及时宣传病情的政策提供了支持。如果能够采取有效的措施来督促有发病状况的人及时地到医院接受治疗, 同时与外界隔离, 会更快地控制病情的发展。从现实经验来看, 如果人们对发病症状比较了解, 病情的严重性认识比较充分, 通常会更快地主动就医。当然有效地增加就医的方便性, 对这方面也能起到比较好的效果。这样看来, 如果我们希望是最终染病人数尽可能减小, 需要通过有效地宣传督促使得患者能够尽快就医。

2. 最初患者个数对病情发展的影响

了解一个系统中最初有几个具有感染性的发病者, 这对系统病情发展情况的影响有多大, 可能可以帮助我们认识到, 我们需要以多大的力量来控制与外界接触的关卡 (比如机场、火车站等), 假设我们考虑的传染源只是输入型病例, 即系统中最初的发病者都是通过外界传入的。我们对比初始病例有 5 例, 25 天后改变就医速度的情况 (即比上一段中介绍的第一种情况初始病例数多

了 4 人, 而其他条件不变), 这时系统在 150 天左右稳定在大约 3 800 人, 如图 5—23 所示。

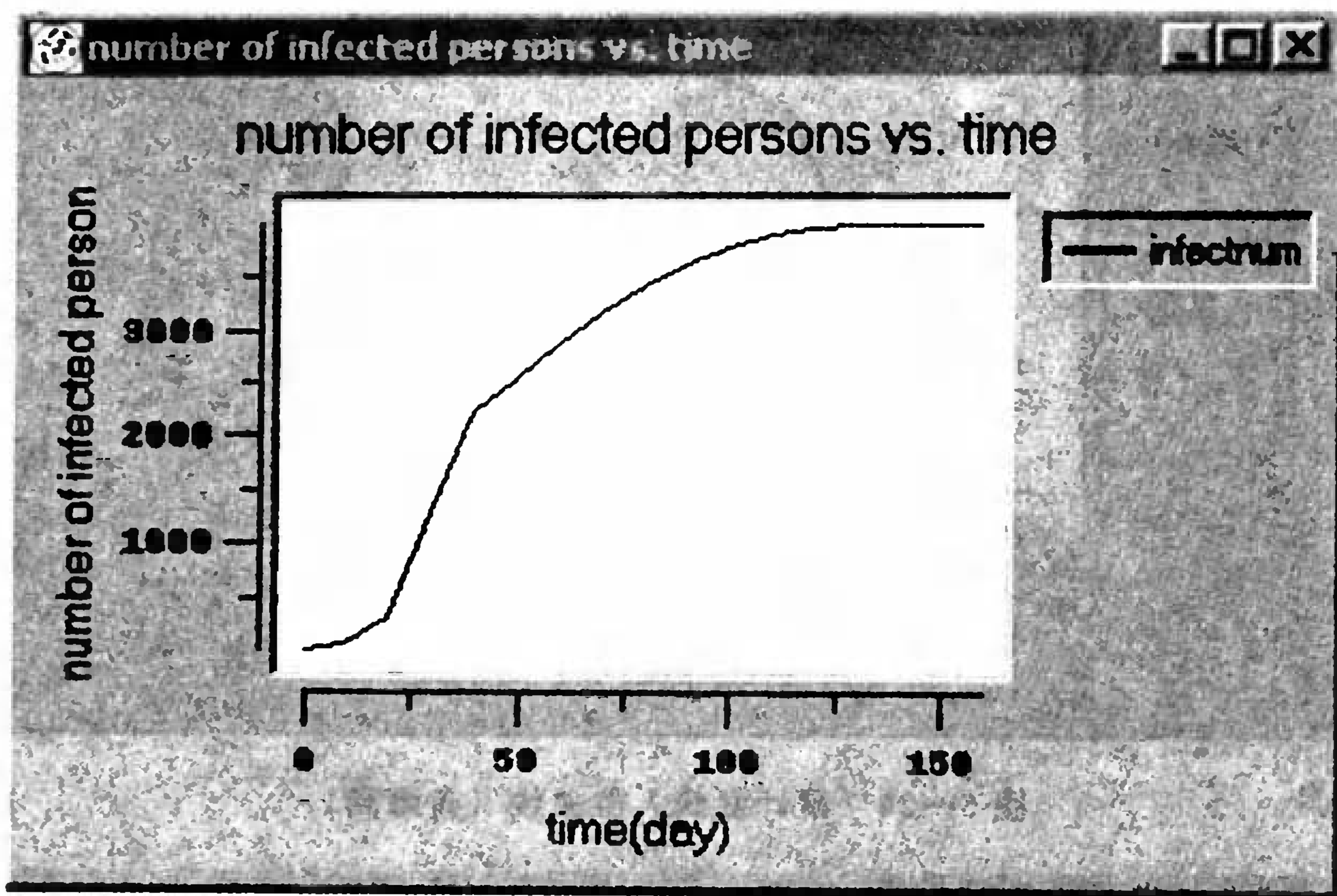


图 5—23 累计发病人数曲线 (25 天改变, 初始 5 例)

可见系统中最开始引入的有传染能力的人数对传染病延续的时间和对总共发病人数的影响都是非常大的。为了控制这个因素, 我们应尽量减少患病者进入系统的可能, 所以对于一些关卡做一些比较严格的控制, 还是非常有必要的。

3. 隔离的效果

前面模拟的系统完全没有考虑隔离的因素, 下面考察系统中引入前面介绍过的隔离机制后, 对病情的控制效果。我们首先对比一下不采取缩减就医间隔的措施这种情况下, 隔离措施的效果 (这样我们可以对比这两种措施下模拟结果对两者效果的反应, 而现实中是无法分离几种措施的效果的)。假设我们在运行 40 天后采取措施, 使 60% 有过接触的人接受隔离, 而就医间隔始终为 3 天, 这时运行结果图如图 5—24 和图 5—25 所示。

从累计发病人数随时间变化图中可以看出在运行 110 天左右, 累计发病人数稳定在 2 500 人左右。而从每日新增病例图中可以看出在第 40 天采取隔离措施后, 下降的趋势比较明显, 而不像前面那种采用减少就医间隔的措施后, 还要经过一段时间的滞后才能取得效果。

因为是在 40 天后采取的隔离措施, 发病人数已经有了一个很大的基数, 尽管从每日新增病例来看下降趋势明显, 可系统依旧在相当的一段时间之后才

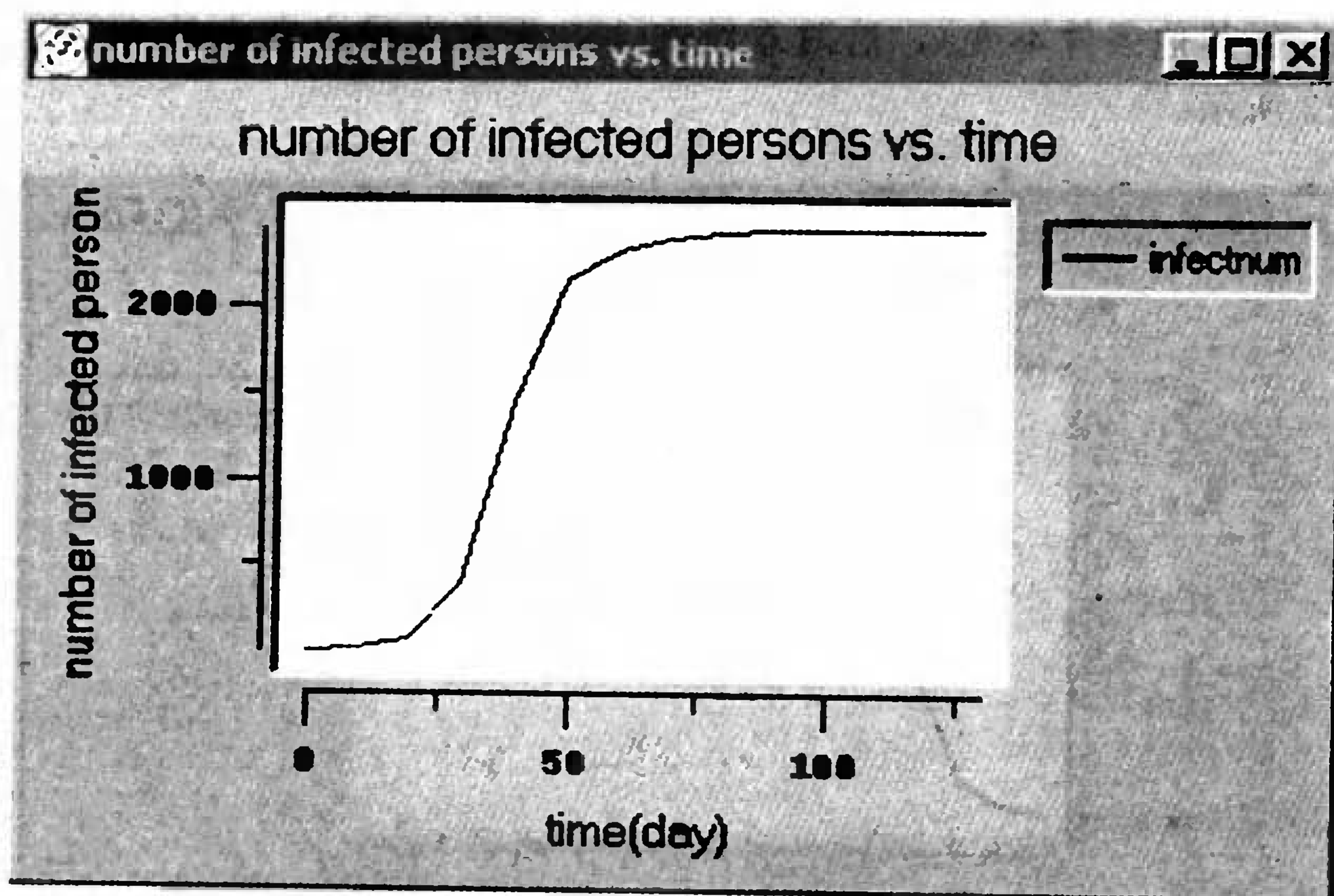


图 5—24 累计发病人数曲线 (有隔离)

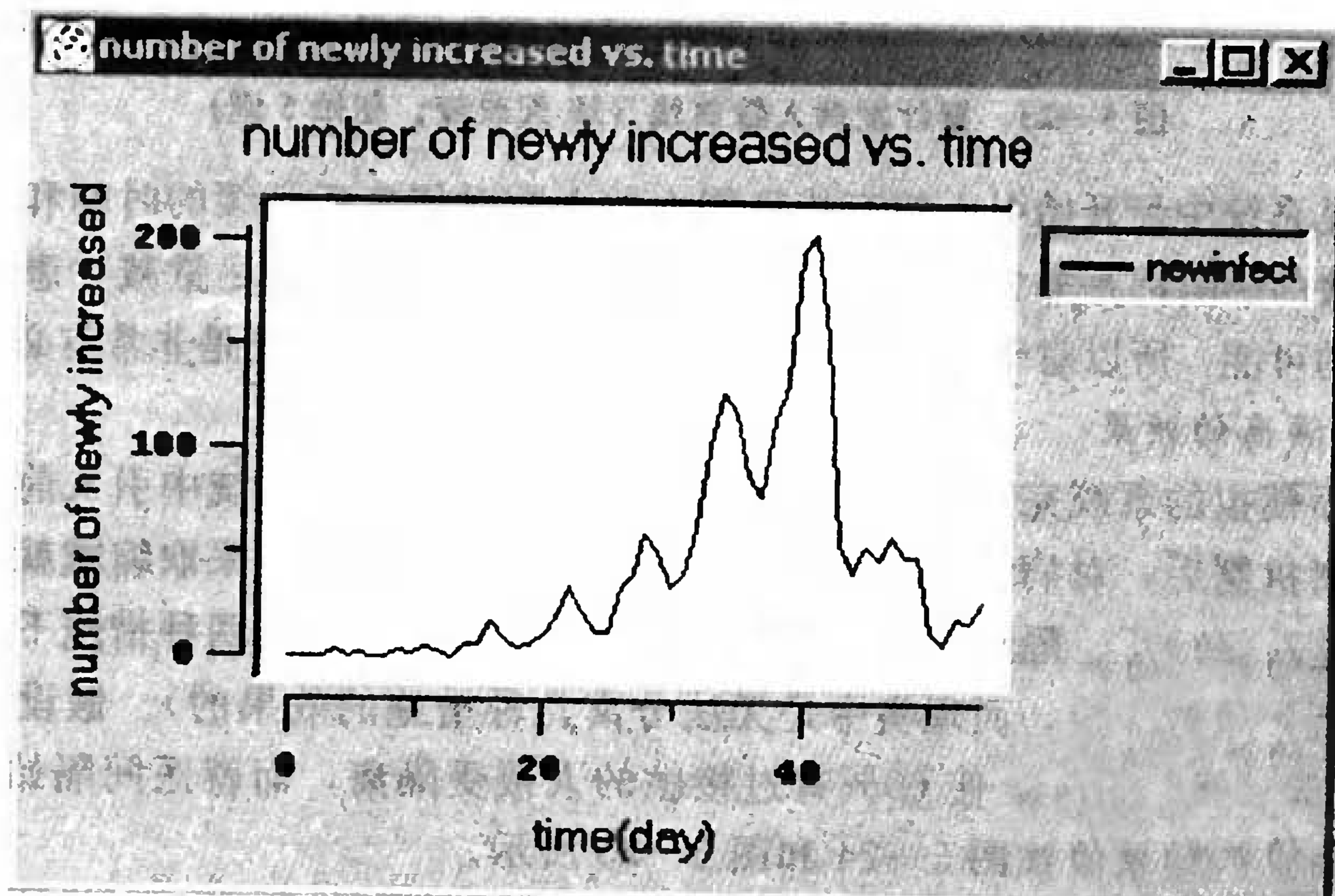


图 5—25 每日新增病例变化区线 (有隔离)

趋于稳定，而且最后的累计发病人数也还是比较大的，那么隔离的效果是不是真的非常显著呢，下面我们模拟一种与上面的情况完全相同只是在第 20 天就对 60% 的接触者采取隔离，这时系统运行 80 天左右，累计发病人数在 420 人左右就达到了稳定。似乎从模拟结果来看越早隔离，而且措施越严格对控制病情会

越有效果,但我们还看到了如果病情已经有了一定的传播范围,这时再采取隔离措施,效果似乎就并不是那么明显了。现实生活中的情况可能更为复杂,一种新的病情从出现到被认识是需要一段时间的,如何能够迅速采取及时有效的措施,还需要有一套完善应急预警的机制。而且大范围地采取隔离对经济、社会生活等诸多方面可能还有许多额外的影响,这还有待于进一步深入研究。

五、基于小世界网络的 SARS 模型研究

(一) 理论背景介绍

关于 SARS 的相关背景在上一个模型中已有所介绍,这里不再赘述。在这个模型中,我们首先简单介绍一下“小世界网络”。

近年来,大量统计数据表明,社会网络模型应是“小世界”模型。小世界的概念是近年来复杂性科学研究的一个新成果,已经在许多应用领域得到应用,如互联网控制、艾滋病传播预测、生物学蛋白质网络动力学研究等。现代交通工具带来的社会网络的新特点,使得研究流行病传播必须使用小世界网络模型。

小世界网络模型是 Watts 和 Strogatz 在 1998 年提出的基于人类社会网络的网络模型,它通过调节一个参数可以从规则网络向随机网络过渡。这个模型的构造算法是:从一个环状的规则网络开始,网络含 N 个结点,每个结点向与它最近的 K 个结点连出 K 条边,并满足 $N > K > \ln(N) > 1$ 。对于每一条边,有 p 概率改变它的目的连结点来重新连结此边,并保证没有重复的边出现,这样就会产生出 $pNK/2$ 条边把一个结点和远处的结点联系起来。改变 p 的值可以实现从规则网络 ($p=0$) 向随机网络 ($p=1$) 的转变。

小世界网络的主要特征之一是结点之间的平均距离随远程连结的个数而指数下降,对于规则网络,平均距离 L 可估计为 N 的平方根,而对于小世界网络, L 约等于 N 的自然对数与 K 的自然对数的商。例如,对一个人口千万的都市,人与人的平均接触距离是 6 左右,这使得社会人群之间的距离大大减小。

将社会中的人们看成是网络中的结点,把人们之间的接触关系表示为结点间的连结边。在模拟中我取网络的大小为 10 000, $p=0.01$, K 值作为一个调节参量待定。根据 SARS 病毒的传播规律,我们把一个人的感染周期分成四个阶段:健康期、潜伏期、传染期、隔离期。一个人被传染后进入潜伏期,这个时期没有传染性,假设平均为 6 天,在不同的人中是标准差为 2 天的高斯分

布。然后病人进入天数为 T 的传染期。在此期间每天每个和他有接触关系的人都有 q 的概率被传染，接着病人被隔离治疗，隔离期我们假设为 10 天，最后病人康复重新进入网络中，我们忽略掉病人死亡的情况。传染率 q 是相对固定的值，因此假设 q 服从均值为 0.05，标准差为 0.01 的高斯分布。再根据实际情况调节 K 值和 T 值来观察病毒传播的情况。

模拟中我们首先在网络中引入一个病源，然后根据规则演化，并记录每步（每天）的患病人数（todayInfectedNumber）和到目前为止总的患病人次（totalInfectedNumber）。

（二）模型介绍

下面我们具体介绍该模型是如何运行的。图 5—26 表示模型中个体的四种状态是如何转化的。

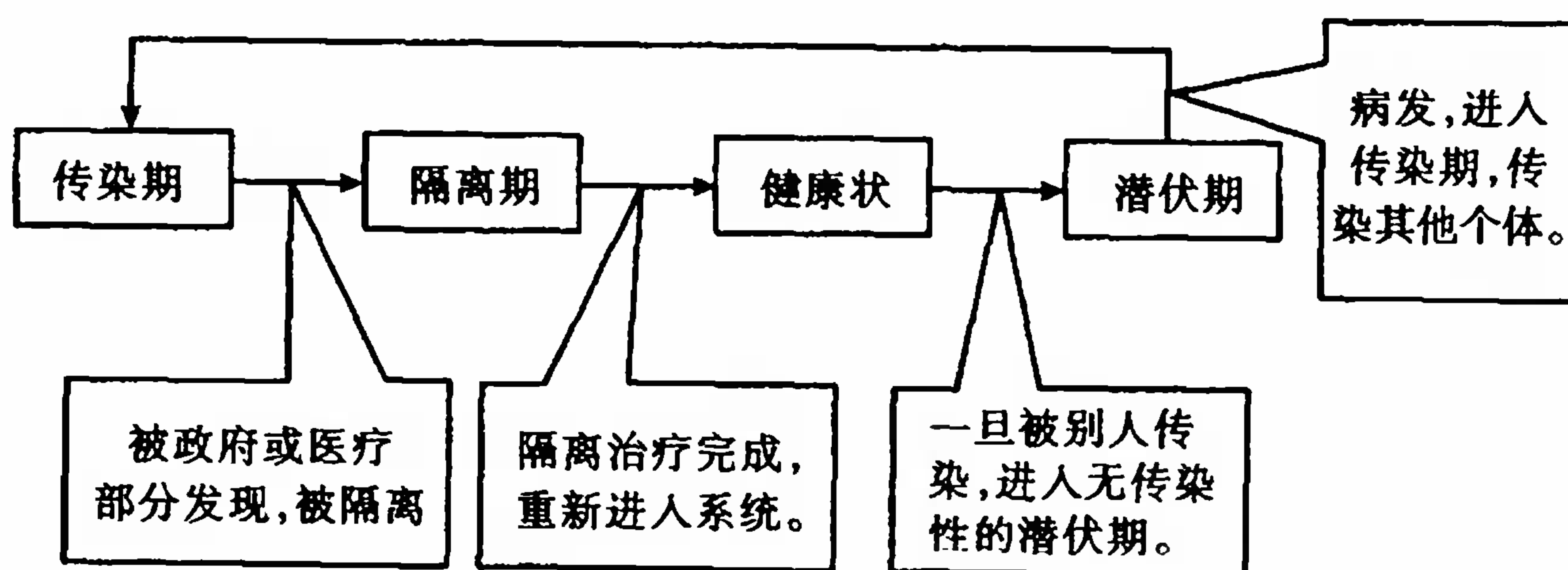


图 5—26 个体状态转化图

在前一部分关于模型结构的介绍中，已经列出了系统运行所需要的参数，这反映了此模型对于现实情况的抽象。具体地说，目前的模型中所要观察和研究的是累计患病人数和当天患病人数，认为系统中对这两个量有重要影响因素包括：每个个体每日接触的人数，被接触后可能会患病的概率，以及潜伏期、传染期、隔离期的长短。考虑对病情的控制因素重点在于两方面，一是政府和医疗部门通过提高对病源的发现效率，来缩短患者发病到就医的间隔。另一方面就是通过媒体向广大市民及时通报疫情情况，使人们能够及时采取自我隔离的措施，减少与外界的联系次数。患者就医及接受隔离措施后都会影响每日接触的人数（这里设置为一旦被隔离，与外界联系失效），从而控制了传播渠道，对病情发展产生影响。

这个模型考虑了两种主体自适应性行为对病情发展的影响，一种是主体通过了解到前 3 天的当天患病人数情况，来调节自己的联系次数，即前三天的当

天患病人数均为增加时，主体会减少外出活动次数。另一种是主体通过可能会因为病情的缓解而放松警惕，即如果连续三天的当天患病人数持续下降，并且当天患病人数 $\text{todayInfectedNumber} \leq 100$ ，则人们将增加对外联系的次数。这两种主体的反馈机制将使模拟结果与真实情况更贴近。

模型中还引入了信息透明度机制，即引入一个表征及时获得疫情情报从而减少自身与外界接触次数的个体占总个体的比例来研究新闻媒体的宣传对疫情发展的影响。

Swarm 模型是在一个时间序列上运行的，即在每个时间点上执行程序规定的一系列动作，上一部分也已经提到，这部分具体是在 ModelSwarm 类中实现的。在 ModelSwarm 中，小世界网络中活动的个体被收纳入四种队列中统一进行管理，这四种队列是：healthyList、delitescentList、infectiousList 和 insulatedList。在 ModelSwarm 的每个时间步中，当四个队列中的个体都执行完相应的对外接触方法后，时间表就会调用 ModelSwarm 的四个方法重整四个队列的元素：checkHealthyList()，checkDelitescentList()，checkInfectiousList() 和 checkInsulatedList()。

时间步中调用的最后两方法 seeIfIncr() 和 seeIfOverLimit() 是启用反馈机制使个体在得到疫情的及时通报时能够及时调整对外的连结边数，具体设置是：前三天的当天患病人数均为增加时，主体每个时间步会将对外连结边数减 2，直到当天患病人数减少；如果连续三天的当天患病人数持续下降，并且当天患病人数 $\text{todayInfectedNumber} \leq 100$ ，主体每个时间步会将对外连结边数加 2，直到当天患病人数增加。

(三) 模型运行结果

1. 模型参数对病毒传播的影响

现在模型有两个可调参数，它们反映现实情况： K 表示人们之间联系的紧密程度，而 T 则表示发现并隔离病源的速度，可以预料 K 越大， T 越长，病毒的传播就越容易； K 越小， T 越短，病毒传播就越难。此模型模拟的结果也证实了这一点。模拟结果显示，病毒传播的速度非常敏感地依赖于这两个参数，只要参数稍变化，病毒的传播速度会发生很大的改变。而且当 T 固定时，对于参数 K ，存在一个临界值 K' ，当 $K < K'$ 时，病毒不能大范围传播，总患病人数到达一定数目后就会停止增长；而当 $K > K'$ 时，病毒将迅速传播开来，感染的人数将持续增长直至所有人都被传染。例如，当 $T=2$ 时， K' 约为 16 左右。

图 5—27，图 5—28 及图 5—29 分别展示了 K 和 T 对病毒传播的影响。

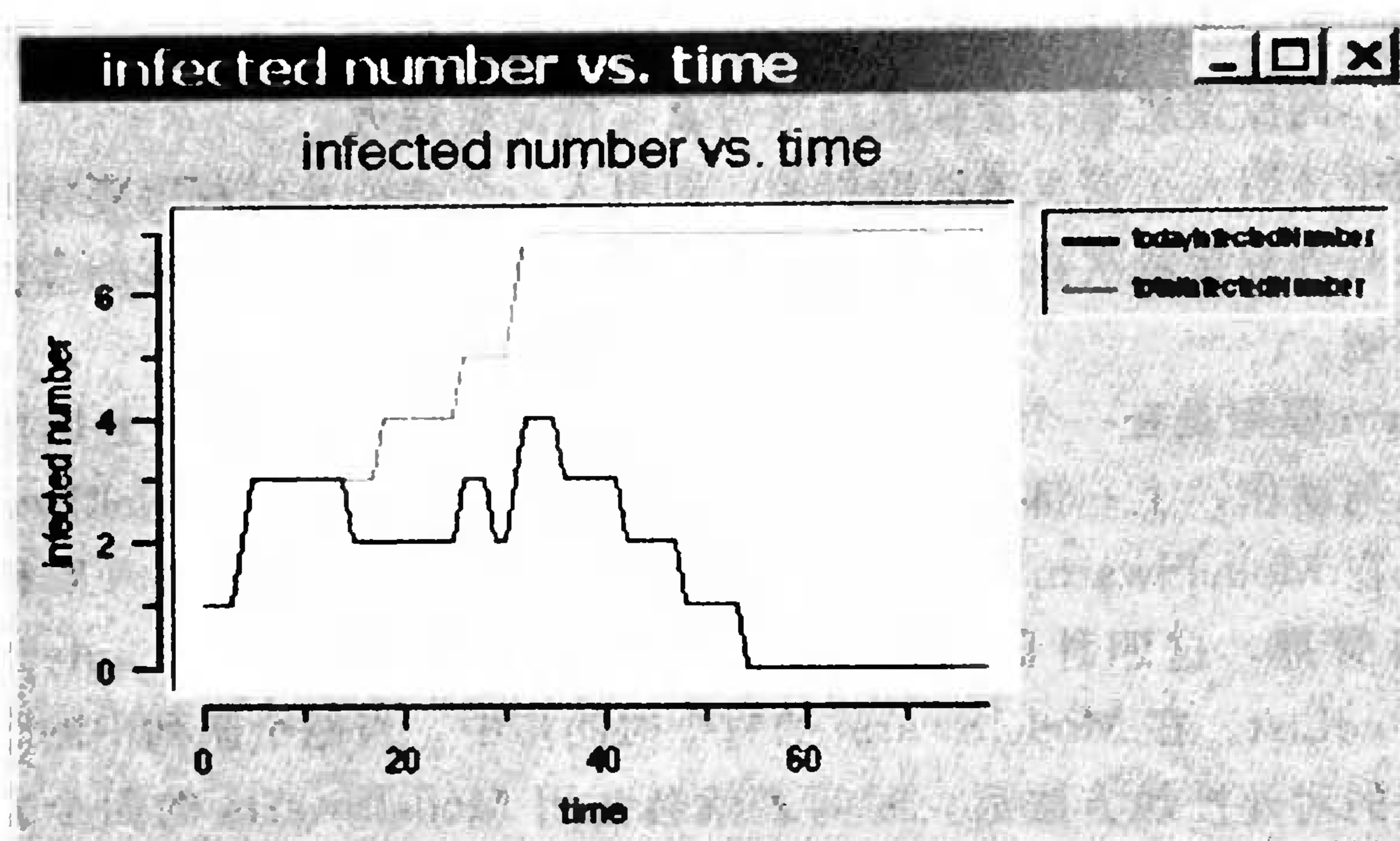


图 5—27 $T=2$, $K=12$ 时, 病毒不能大范围传播, 自动衰减

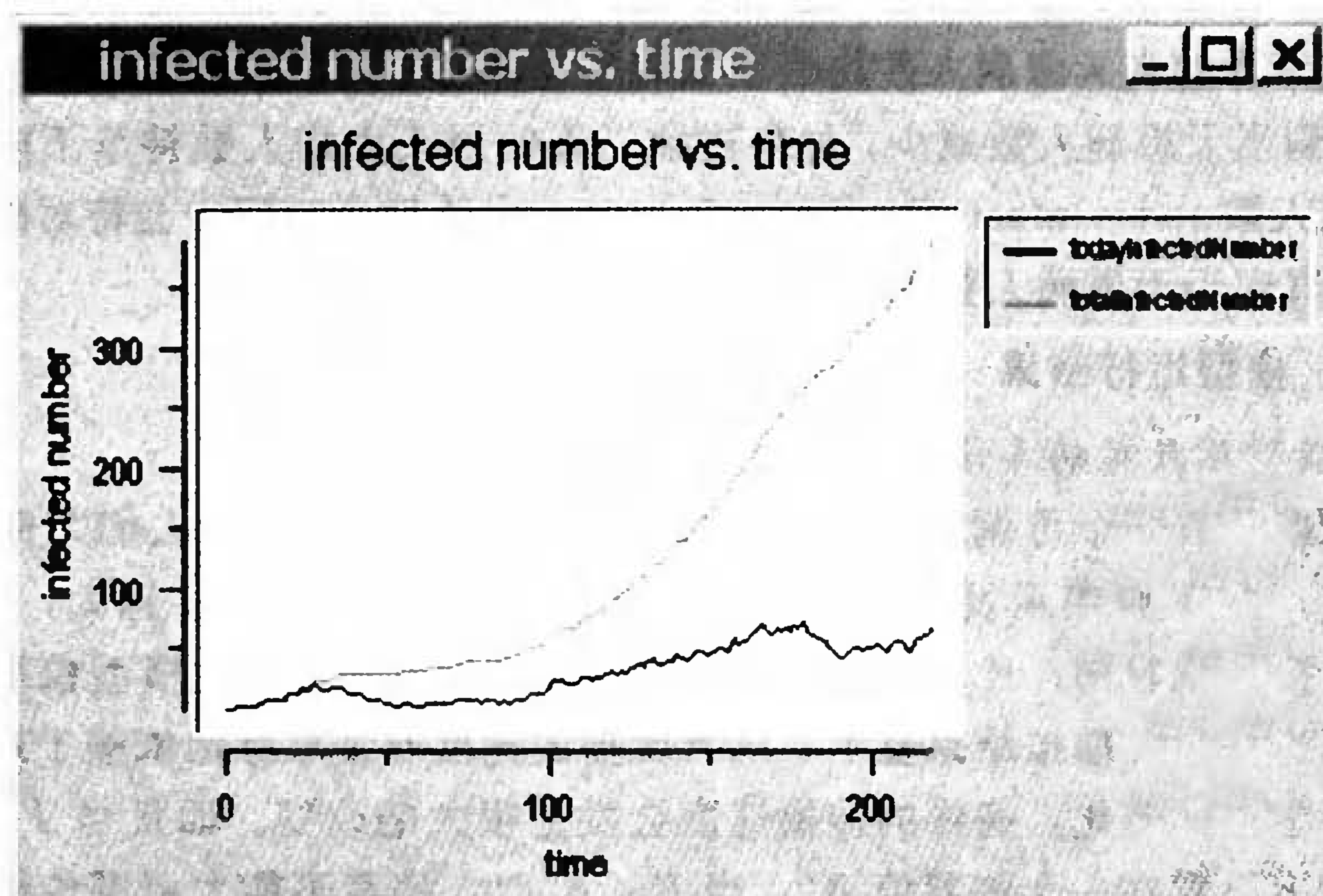


图 5—28 $T=2$, $K=20$ 时, 病毒迅速传播开来

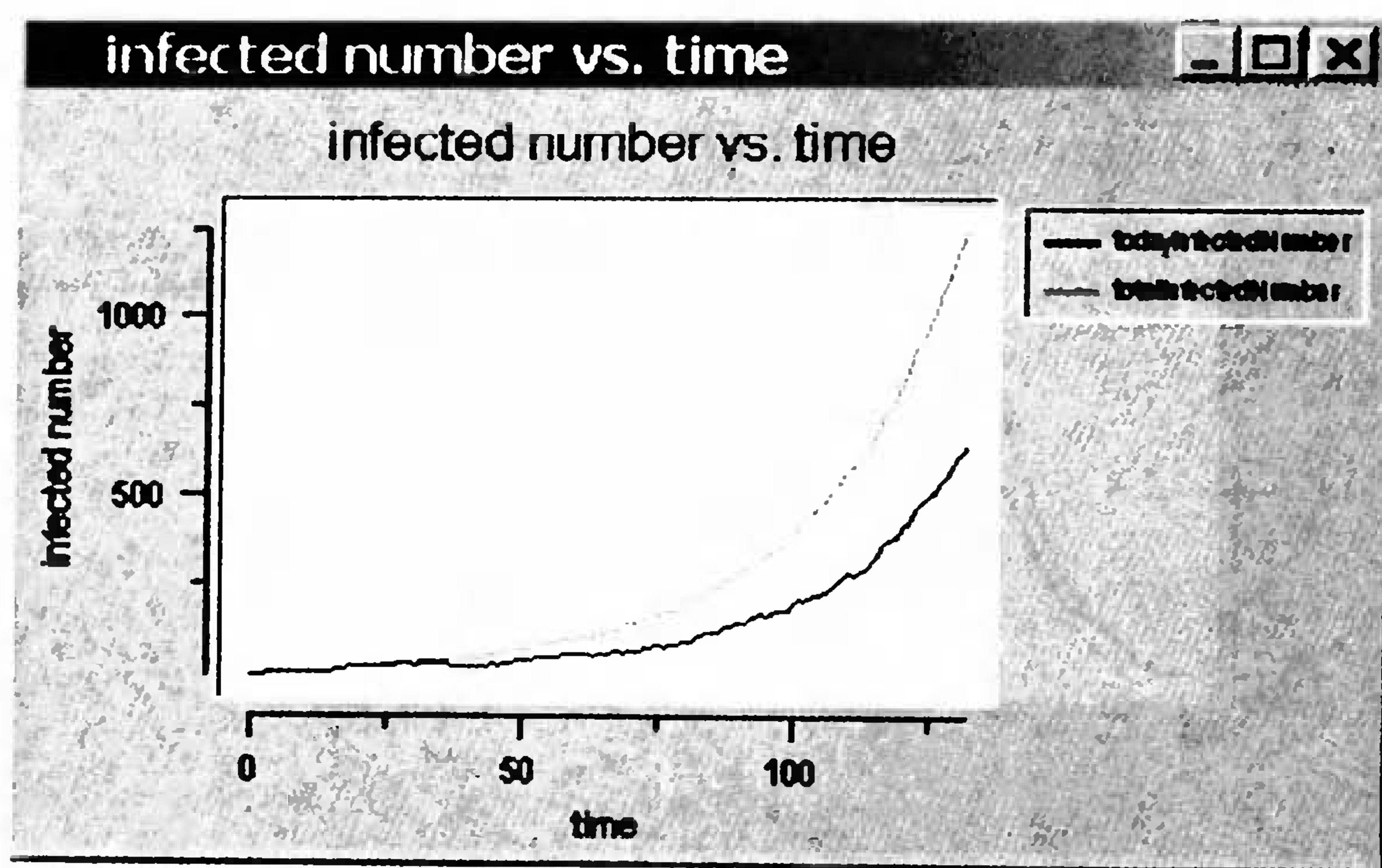


图 5—29 $T=3$, $K=20$ 时, 可看出 T 只要增加一天, 传播速度就会大幅度增加

由以上各图可看出, 不能及时发现病源, 以及人们之间接触太多会非常有利于病毒的传播, 初期出现的病毒的爆发正是由于这两个原因, 要控制病毒的蔓延, 就得从这两个方面入手。

2. 引入反馈机制后对病毒传播的影响

如果不引入其他的机制, 那么病毒的传播就只有两种结果, 要么自动衰减, 要么迅速蔓延, 这显然都跟现实情况不一致, 因此有必要导入新的机制使得病毒在传播开后能够被抑制住。

减小 K 值和 T 值可以抑制病毒的传播。 T 值的减小有赖于政府和医疗部门加强对病源的搜索效率的提高, 而 K 值的减小则和制定隔离制度, 以及人们的自觉性有关系。人们的自觉性是一个渐变的过程, 会随着疫情的变化而变化, 属于反馈过程。引入这个反馈过程可以达到抑制病毒扩散的效果。

具体反馈过程如下: 初始状态 $K=K'$, 当人们发现最近连续 3 天 (反应时间) 的当天患病人数 `todayInfectedNumber` 都增长时, 人们就把自己的连结边数减 2, 直到 `todayInfectedNumber` 减少。模拟结果如图 5—30 所示。

由图 5—30 可知, 引入反馈机制使人们自我隔离后, 病毒的传播得到有效的控制, 因此, 大家自觉地进行自我隔离, 减少和别人的接触是防止病毒传播行之有效的办法, 也说明了现实中对抗 SARS 的隔离制度是正确的。

如今 SARS 疫情已经过去了, 但如果当时人们放松警惕, 不能贯彻好隔离制度, 又会有什么样的影响呢? 这里我们用这个小世界网络模型来推测试试。

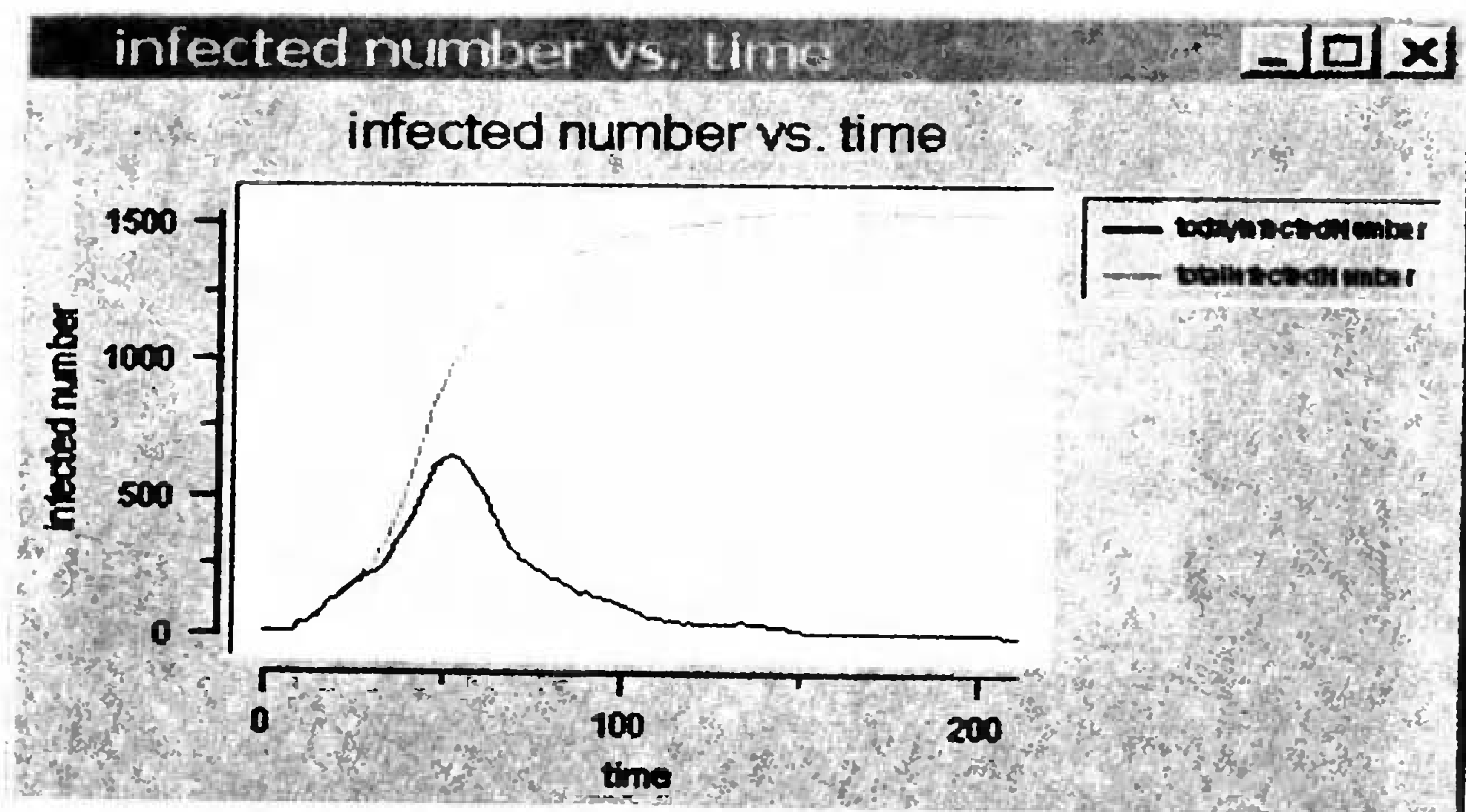


图 5—30 $T=2$, $K'=80$ 时, 可看出引入反馈机制后, 能有效地抑制病毒的传播

在上述反馈机制中加入一条, 当人们发现当天患病人数 $\text{todayInfectedNumber} < 100$ 且连续三天 $\text{todayInfectedNumber}$ 都下降时, 就会放松警惕, 每天把自己的连结边数都增加 2, 直到 $\text{todayInfectedNumber}$ 不再减少为止。模拟情况如图 5—31 所示。

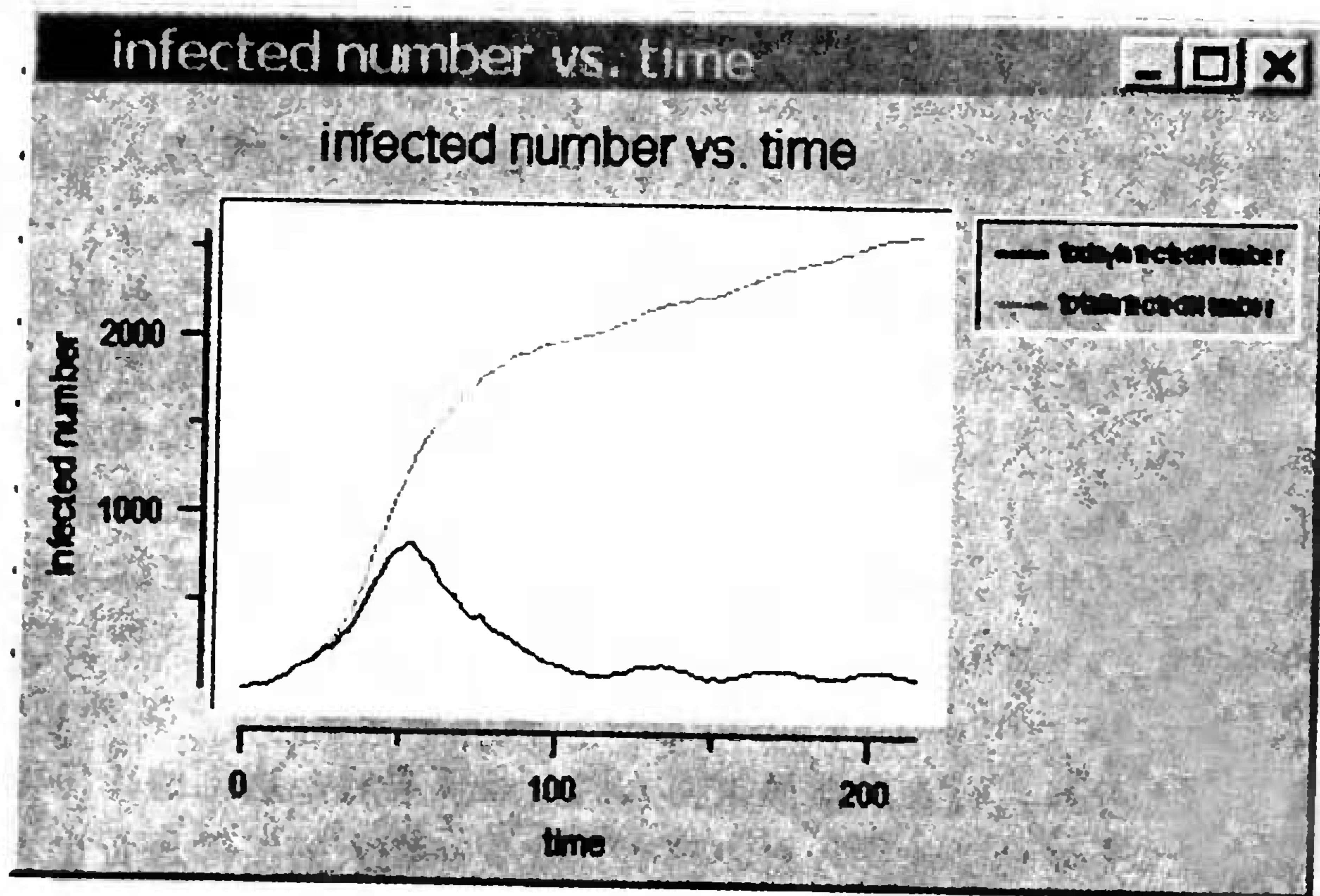


图 5—31 放松警惕后的病毒传播, $T=2$, $K=80$ 时, 人们一旦放松警惕, $\text{todayInfectedNumber}$ 就很难降到 0, 而且会发生震荡, $\text{totalInfectedNumber}$ 会持续增加

由图 5—31 可知,即使在疫情已经缓和的情况下,一旦大家放松了警惕,病毒就会死灰复燃,患病人数 `todayInfectedNumber` 会始终在人们的思想警戒线附近波动,患病的总人数也会不断地增加,这样疫情始终得不到根治。因此,在当前形势下,尽管疫情已经减轻了,但是这才是最关键的时候,一定不能麻痹大意,要贯彻好隔离制度,提高警惕性和自觉性,这样才从根本上战胜 SARS。

3. 信息透明度对病毒传播的影响

实际情况下,不是所有人都能够及时获得疫情信息从而开始自我隔离。例如,在北京,直到 4 月 20 日公布了准确的患病人数后才开始大规模地采取措施进行自我隔离,因此在这里就有一个信息透明度的问题。在这个小世界网络中,引入一个表征信息透明度的量 `infoDiaphaneity`,它指模型中能够及时得到疫情情况从而进行自我隔离的人数占总人数的百分比,即每次减小连结边数目的结点比例为 `infoDiaphaneity`。从图 5—32、图 5—33、图 5—34 和图 5—35 中,可以看出信息透明度对病毒的传播也有很大的影响。

把图 5—33 中 `todayInfectedNumber` 线的顶端放大,可看出当天最大病患人数为 310 左右;而把图 5—35 中 `todayInfectedNumber` 线的顶端放大,可看出当天最大病患人数为 150 人左右。对比两对图 (`infoDiaphaneity=0.7` 和 `infoDiaphaneity=1` 的结果显示),不难看出当信息透明度高时,疫情消失需要的时间比较短,高峰期患病人数也比较少,因此让人们尽早知道疫情情况,从而做好预防措施也是控制疫情的有效方法。

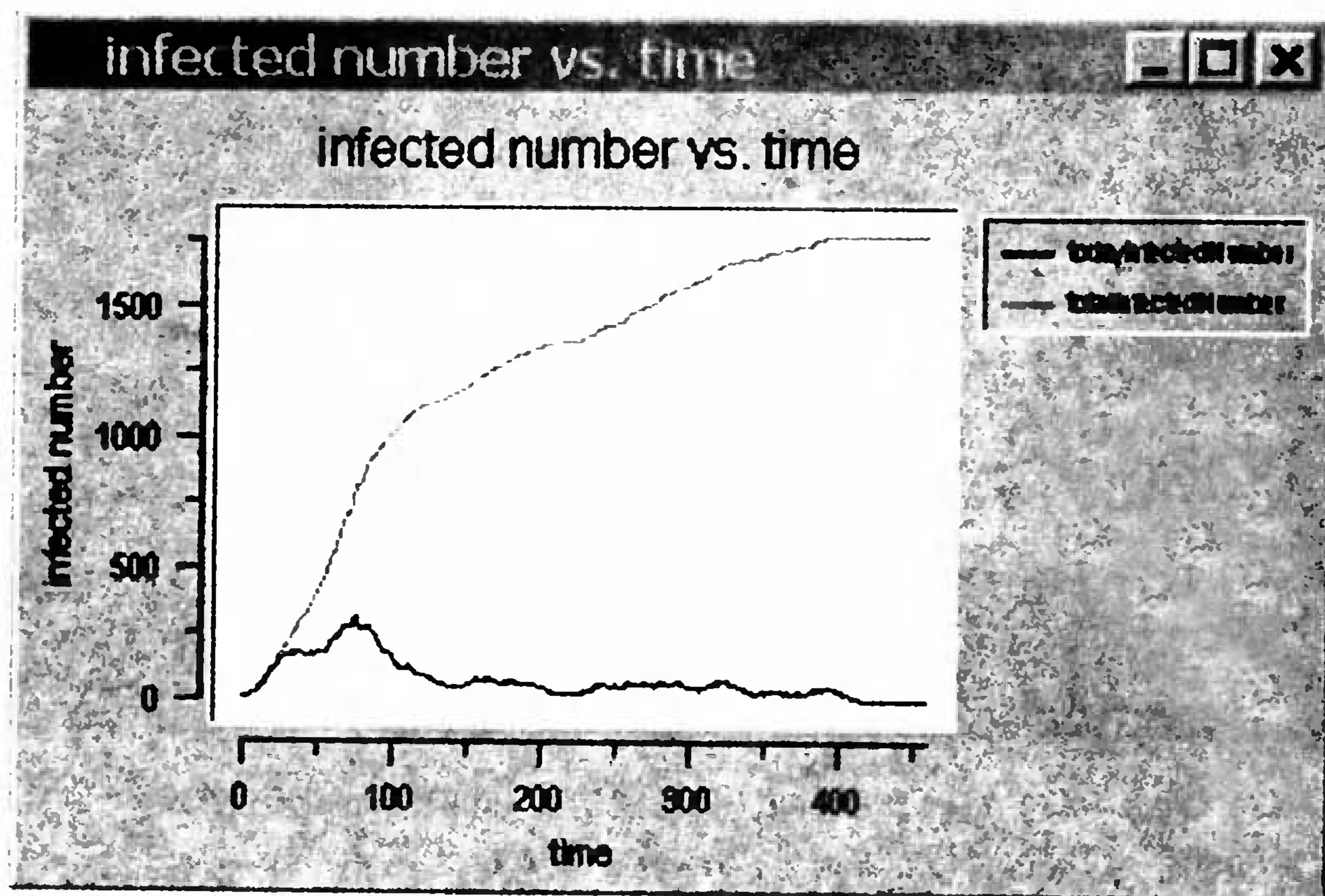


图 5—32 $T=2$, $K=60$, 信息透明度 `infoDiaphaneity` 为 0.7

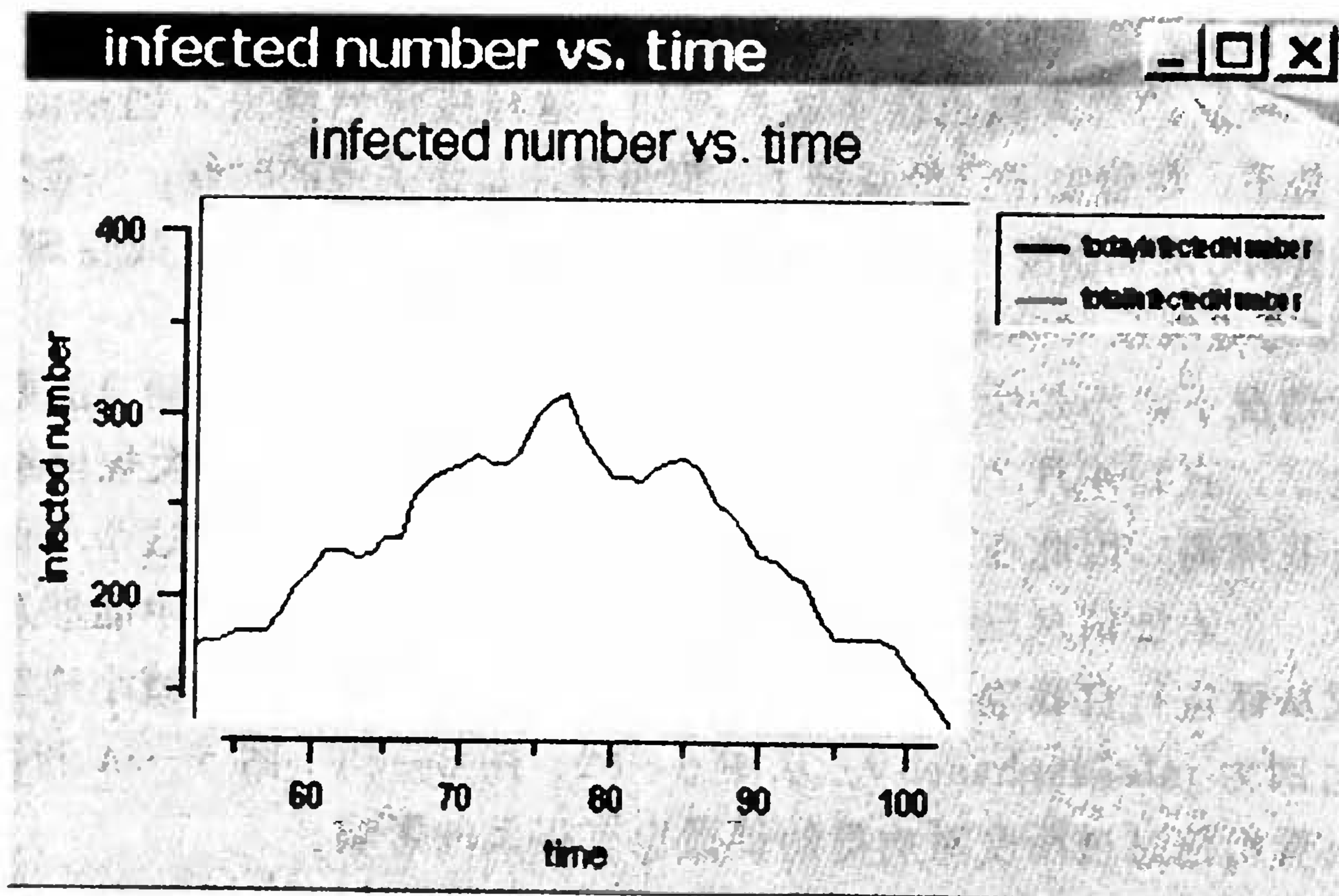


图 5—33 todayInfectedNumber 线的顶端放大，
可看出当天最大病患人数为 310 左右

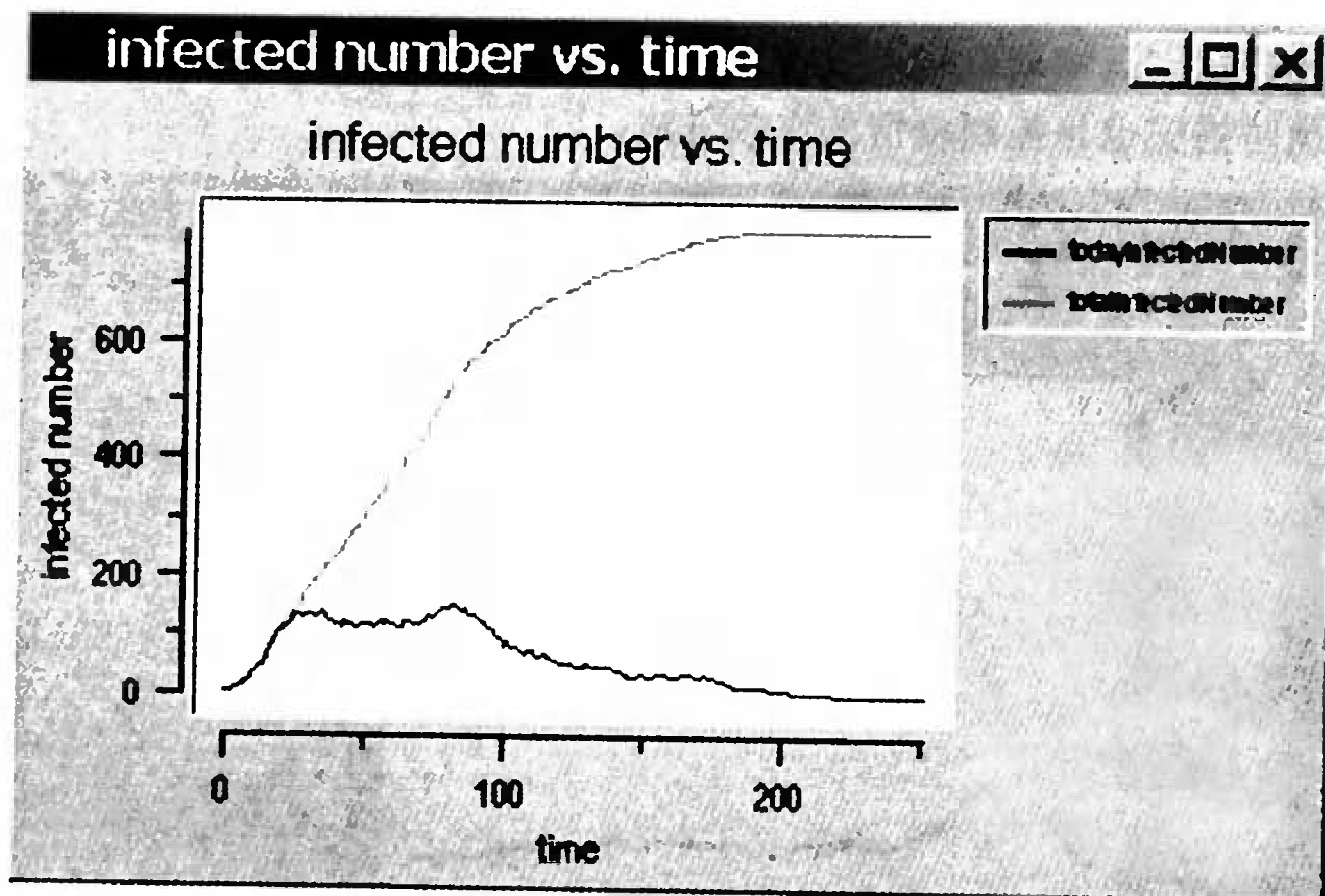


图 5—34 $T=2$, $K=60$, 信息透明度 infoDiaphaneity 为 1.0

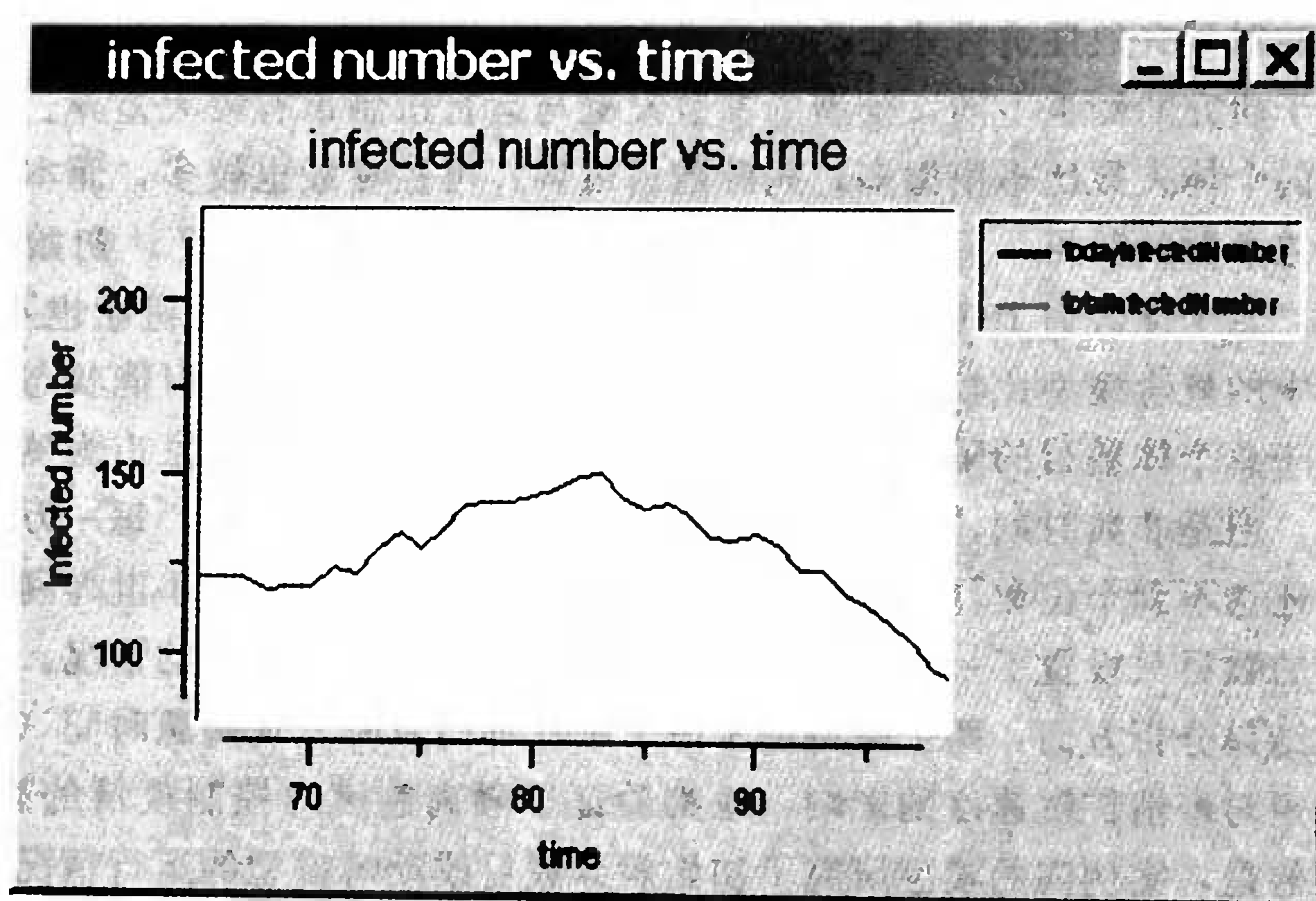


图 5—35 todayInfectedNumber 线的顶端放大，
可看出当天最大病患人数为 150 左右

(四) 与案例四 SARS 模型的比较

首先说说两个模型设计思想的异同，两个模型都是从 SARS 传播过程的复杂性出发，研究了这样一个问题：究竟存在哪些关键性的因素，会影响 SARS 的传播速度？通过研究对传染病传播蔓延影响比较大的几方面因素，并对几种可能的控制方法的效果做一定的对比分析后，我们得出如下结论。

案例四模型的主旨是力求使过程与结果的数据尽量贴近真实的疫情发展过程，使得此模型对可能的控制方法效果所做的评价客观公允，因此不论是在模型的参数设置还是运行机制，都比较精密细致。而本模型的主旨是通过对 SARS 传播过程的模拟，来证明用复杂网络模拟，特别是小世界网络模拟，在模拟社会网络、研究大型社会的经济问题时，其有效性是非常高的。因此，本模型的结构非常精简，参数设置与运行机制可能不能完全真实地反映现实情况，但也成功地得到了与现实病毒传播相近的趋势，同时提出了与病毒传播速度相关的网络参量，并通过引入网络反馈机制验证了几种控制病毒传播的可能手段。

关于模型的底层结构，案例四以基础的复杂系统思想为指导，为系统设定一些规则后让系统在一定的环境下自发地演化，然后考察系统演化过程中表现出来的若干性质，没有事先安排好的网络结构。而本模型是构建在小世界网络的基础上，模型中的个体在每一时间步上的动作都是在这个网络的边上进行，

因此才能对其有效性进行评估。

由于研究的侧重不同,模型的参数设置与运行机制也有较大差异。案例四所采用的个体人数比本模型多,病源数目可调,可控参数也较多,而本模型精简了可控参数的数目,只留下结点连结边数 K 与隔离期长度 T ,初始病源人数固定,总个体数为 10 000 人。由于人数的差异,模型的运行机制也不一样,案例四中的概念模型比较完善,运行机制中考虑了个体的各种可能状态。而本模型由于总个体数目的限制,忽略了死亡状态,原因是,以北京市为例,人口过千万,但是非典时期,因病亡故的人员没有过千。按比例计,每一万人中死亡个体还达不到个位数。由于家用电脑计算能力的限制,本文小世界网络模型中结点的数目只设置了一万个,所以能够假设个体不存在死亡的情况。

在结果分析方面,两个模型都考虑了医疗部门及时发现病源时间(即传染期)长短对疫情扩散速度的影响,也都验证了隔离制度对控制疫情的有效性。所不同的是,案例四的模型研究了初始病源数目改动时模型的运行情况,而本模型则研究了信息透明度对控制疫情的作用。

六、假日经济模型

(一) 背景概述

众所周知,社会经济系统是一个开放的复杂巨系统,其中包括着行为方式最多样的参与者——人。在一些传统方法对其分析力不从心的时候,我们开始使用多个自适应主体建模的方法来尝试研究它。本研究从人类生活的时间分配和资源配置角度,探讨了假日经济的理论问题。通过试验的模拟结果,为政府的政策决策提供了一些参考依据。

在介绍模型之前,我们先向大家介绍一些背景知识。

什么是假日经济?所谓假日经济,是指在节假日由各种资源的配置、供给和需求所引起的经济行为。一方面是假日消费(即假日需求),一方面是假日供给。从假日消费来看,假日经济与人们的收入水平、时间分配、生活方式、消费观念等因素有关。假日消费多属于闲暇消费。假日经济这个概念在中国是有其特定含义的,特指 1999 年国务院调整了节假日时间,通过上移下借的方法,形成的“五一”、“十一”、“春节”三个长假后,出现了节日集中消费的现象。

假日消费包括四个层次,第一是满足生理需要层次的消费,这与平时消费内容相同。只是消费时间更加集中,这也符合中国人的消费习惯——过年过节

购买相对较贵的商品,添置一些新的消费品,还有就是过年过节的礼品消费。这些消费对于旅游城市(如北京)来说,也是不可小视的,商家必须善待并满足这种层次上的需求。第二是满足健康娱乐层次的消费,如体育活动、旅游活动等。第三是满足发展需要层次的消费,如够买书籍、参加某种短期学习等。第四是满足精神需要层次的消费,如献爱心等公益活动。

从供给看,假日经济主要与闲暇产业有关,所谓闲暇产业是指与旅游、体育、娱乐、闲暇教育、兴趣爱好等以及相关的产业。如交通、餐饮、旅馆饭店、旅游点、商业、邮电信息、金融保险、舞厅剧院、体育场馆、面向市民的休闲教育、花卉、集邮等。

闲暇产业的供给状况会直接影响闲暇消费的满足程度。一般情况下,休闲品在节假日需求大于供给,而在非节假日需求小于供给。闲暇设施的供给自然不能按照最大需求供给,这样会导致大量资源浪费,当然也不能按照最小使用量安排,否则出现供不应求的状态。这正是闲暇消费和闲暇供给的矛盾律。这个矛盾律无论在发达国家还是发展中国家都不同程度地存在。

1. 假日经济的形成

在发达的西方国家,第二次世界大战以后,由于科学技术的发展,劳动生产率的提高,收入水平的提高,劳动和家务时间减少,闲暇时间增加,闲暇时间的利用问题特别是假日消费问题受到人们普遍的关注。

假日经济是社会发展到一定历史阶段的产物。假日经济的直接原因是科学技术进步和劳动生产率的提高,除此之外,还有

- 居民收入的增加;
- 生活时间分配结构的变化,主要是劳动时间减少,闲暇时间增加;
- 闲暇设施的供给增加,特别是第三产业的发展,是假日经济的必要条件;
- 各种社会保障制度以及消费贷款制度的确立;
- 假日经济与新的闲暇观的确立。

从经济学的观点,至少19世纪之前,许多经济学家认为闲暇消费是反经济的,有害于生产力的发展。但是,人类进入工业化社会以后,劳动生产率不断提高,劳动时间的缩短并不意味着生产相应减少。另一方面,消费的增长,也可以刺激经济增长。

2. “共时化”与假日经济

人类活动的“共时化”是工业化社会维持社会经济正常运转的必要条件之一。在工业化社会里,机械化流水作业、列车运行、学生上课、看电影等活动

中，人们都要遵守共同的时间。所谓共时化就是由于必要的集中，人们在同一时间做相同事情的现象。这种“共时化”往往还带有空间上的集中化。

由于时间上的共时化和空间上的集中化，就会出现在节假日使用设施过分集中的现象，这在交通、旅游、通信等第三产业的设施更为突出。这也是政府决策急需获得假日经济理论支持的地方。

因为可以获得的真实数据有限，我们选取了假日经济中的一个重要侧面——体育休闲产业，通过对它的供求研究，来探讨我们的假日经济理论和政府对策。

（二）模型介绍

多主体假日经济模型中包括两类主体：居民和体育休闲产业。居民会根据自己的收入、假期状况选择何种档次的体育休闲活动，还会通过每一次的满意程度修正自己下一次的决策行为。

具体地说，体育休闲产业是一个供给量，一般情况下，它是不变动的。我们将之分为高、中、低三档。供给量分别是：10，70，120。这3个变量的变动一般表示政府加大投资，进行基础体育设施建设，或者是商家看准时机，投资于休闲体育消费领域，建立了一些以营利为目的的体育活动场所。这些参数是可以调整的，用以试验我们的供给多少才可以动态平衡地满足居民需求。

居民是自适应的主体。因为微机的计算能力限制，我们只能模拟200人的群体。居民的属性有收入水平、每次消费后的满意度。我们根据抽样数据假定约70%为低收入人群，25%为中等收入人群，5%为高收入人群。这是对居民分类的一个简化，其实还有很多因素影响人们到底选择什么档次的体育活动，例如文化素质、年龄（老年人一般不会选择像足球这种高对抗的游戏，而一般青少年也不会选择扭秧歌）等，在这里我们简化了，粗略地认为这种比例划分就包括了那些因素，其实我们在模型中的每一步都是重新将人群进行分组，而且有随机波动，所以还算是比较准确地将人群分组了。

我们模拟的每一步都是先根据居民的收入水平和上一次消费后形成的满意度计算出这一次他会选择哪一档次的体育活动，然后，分别统计选择三类体育活动的人的总数，与供给量相比，如果供大于求，则满足容易每个人的消费，对于这一类消费的满意度就会上升。那么下一次他还选择这种体育休闲消费的概率就会上升。如果供不应求，则表示可能会因为过于拥挤，长时间排队、场面混乱等情况让选择这类消费的人不能尽兴，无法满足需求，人们对于这种档次消费的满意度就会降低，以致下一次可能选择这种体育活动的概率减少。

另外，我们也考虑到一些福利性质的休闲活动，比如集体组织的一些高档消费，那么在这种情况下，收入低的人也可以消费高档体育设施，所以我们设计了一个随机数来体现这种情况。

这样，我们就可以通过计算机模拟来观看需求的变动情况，如果抽样收集到的数据真实可靠，我们就可以知道哪个档次的体育设施供过于求，或供不应求，或供求平衡。然后我们可以通过修改参数，比如各种体育设施的数目，也即调整供给，来研究到底要增加多少才可以动态满足需求，不至于无法满足人民群众日益增长的物质文化生活的需要，也不至于过度投资造成浪费。

我们甚至可以试验一些政府可以实行的政策，例如错开假期，带薪休假，避开上面提到的“共时化”问题。或者指导商家施行弹性价格，在淡季适当调低价格，吸引低收入群众消费一些高档活动。我们做了实施带薪休假的试验，详见后面的模型结果分析。

我们之所以设计这个模型，是因为在统计分析的基础之上，我们只能知道大致供给平衡的数量是多少，但是这是一个动态的平衡。因为正如前面所提到的，节假日的消费量是最大值，而平时的消费量可能远远低于这个量，如果实际中按照最大量供给，会造成资源的极大浪费。而且随着消费者满意度的变动，每次消费的人数又不同，这是微观问题，需要从个体入手，而且每次都不同，所以依靠统计方法难免粗略，我们就使用这种从微观行为交互以涌现宏观现象的复杂适应系统思想建立计算机模型，帮助我们观察系统的状态变化。

另外，对于一些政策，我们可以在理论上提出（如我们在下面将会谈到的规避共时化方法），但是我们不知道实际实施后效果会怎样，所以作为政府决策部门有时候会心里没底，政策结果的不确定性很强，而统计预测方法只能是根据以往已有的案例来预计曾经执行过的方法的效果，而对于从没有尝试过的新手段显得力不从心，即使有结果，可信度也不是很大。这是统计方法本身性质决定的，它考虑不了新手段对微观主体行为的影响，因而也就无法预测其结果。然而这却是我们这个模型所擅长的，我们可以深入到每个个体的行为，将新政策的影响考虑进去后，我们再进行统计，观察每个微观个体行为改变以后在宏观层面上会出现怎样的结果。

（三）模型结果分析

我们首先来看一下高、中、低档供给分别是 10，70，120 时的供求情况。图 5—36 是低档体育设施的供求关系图。

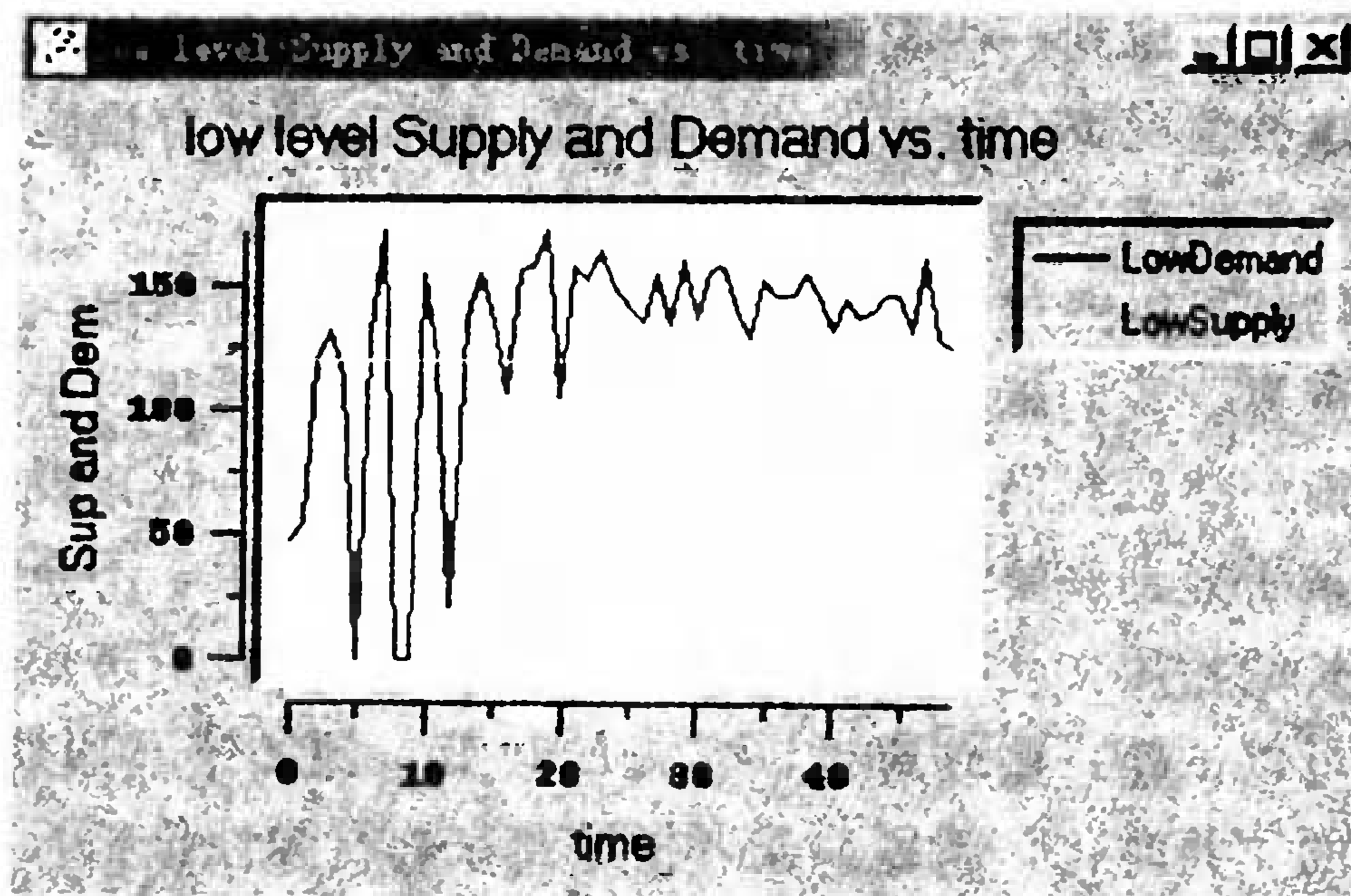


图 5—36 低档体育设施的供求关系

我们可以看到需求高于供给，而且即使我们设计了满意度参数，在供不应求的时用来下调下一次选择该类体育活动的人数，可是我们发现，需求还是大于供给。这种情况在现实生活中是可以得到验证的：虽然没有活动场所，还是有很多老太太在诸如商场、会馆前面的广场上扭秧歌；即使没有足够的足球场，还是有不少孩子在高架桥下的空地上、故宫门前的广场上踢球。这说明我国人民的体育活动需求是很大的，即使现有的设施满足不了，他们也会自己想出折中的办法。

这也提示政府部门，既然有这种供需矛盾，就应该加强基础体育设施的建设。我们欣喜地看到，这种情况已经有了不少改观。比如利用体育福利彩票募集的资金修建了不少小区内的健身器械。

下面我们对参数做调整，把低端供给增加到 200，看看会有什么结果，如图 5—37 所示。

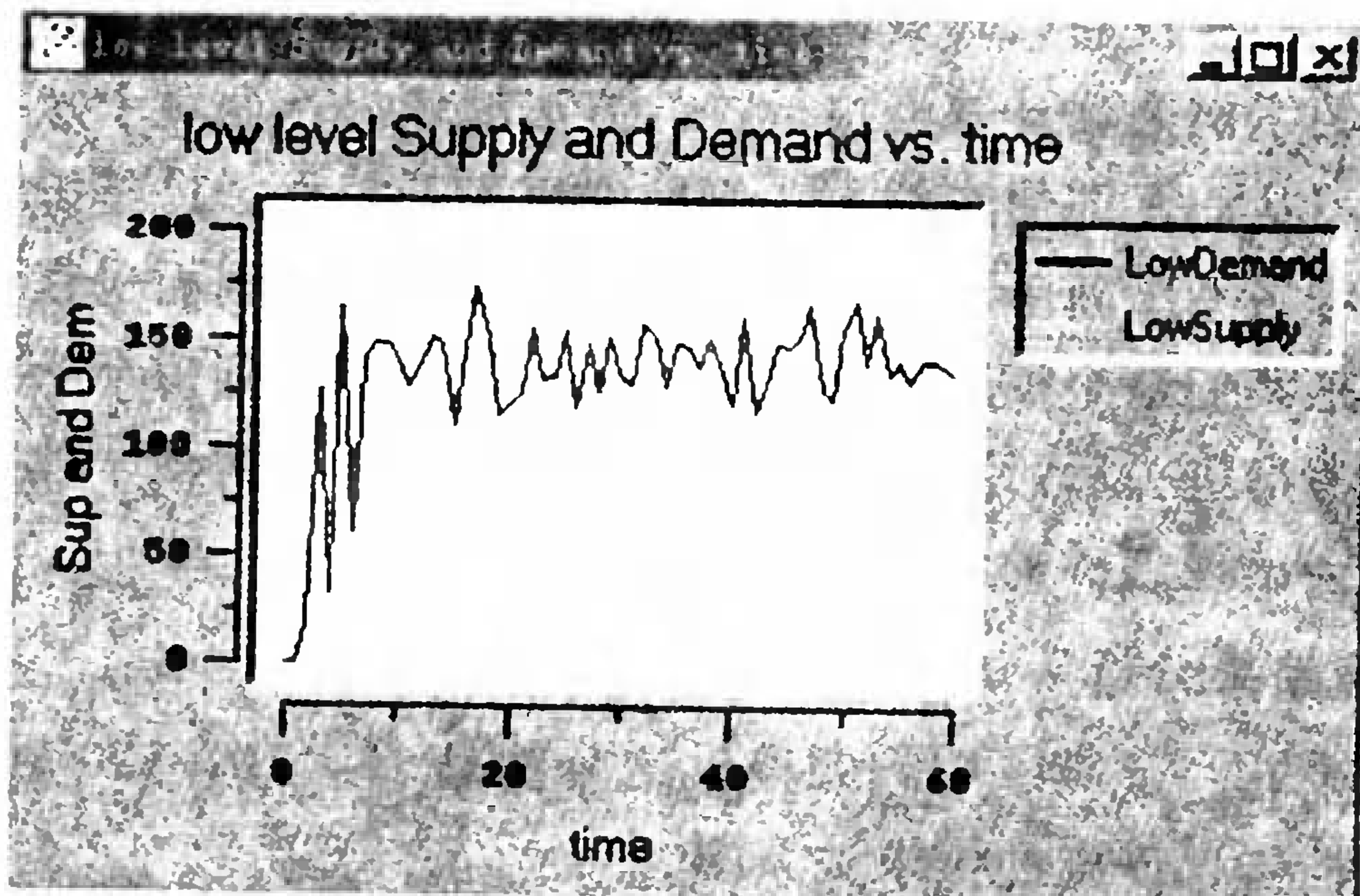


图 5—37 供应水平为 200 时的供需关系

我们看到，如果调整到 200，就会出现资源的浪费。我们将其调整为 150，其结果如图 5—38 所示。

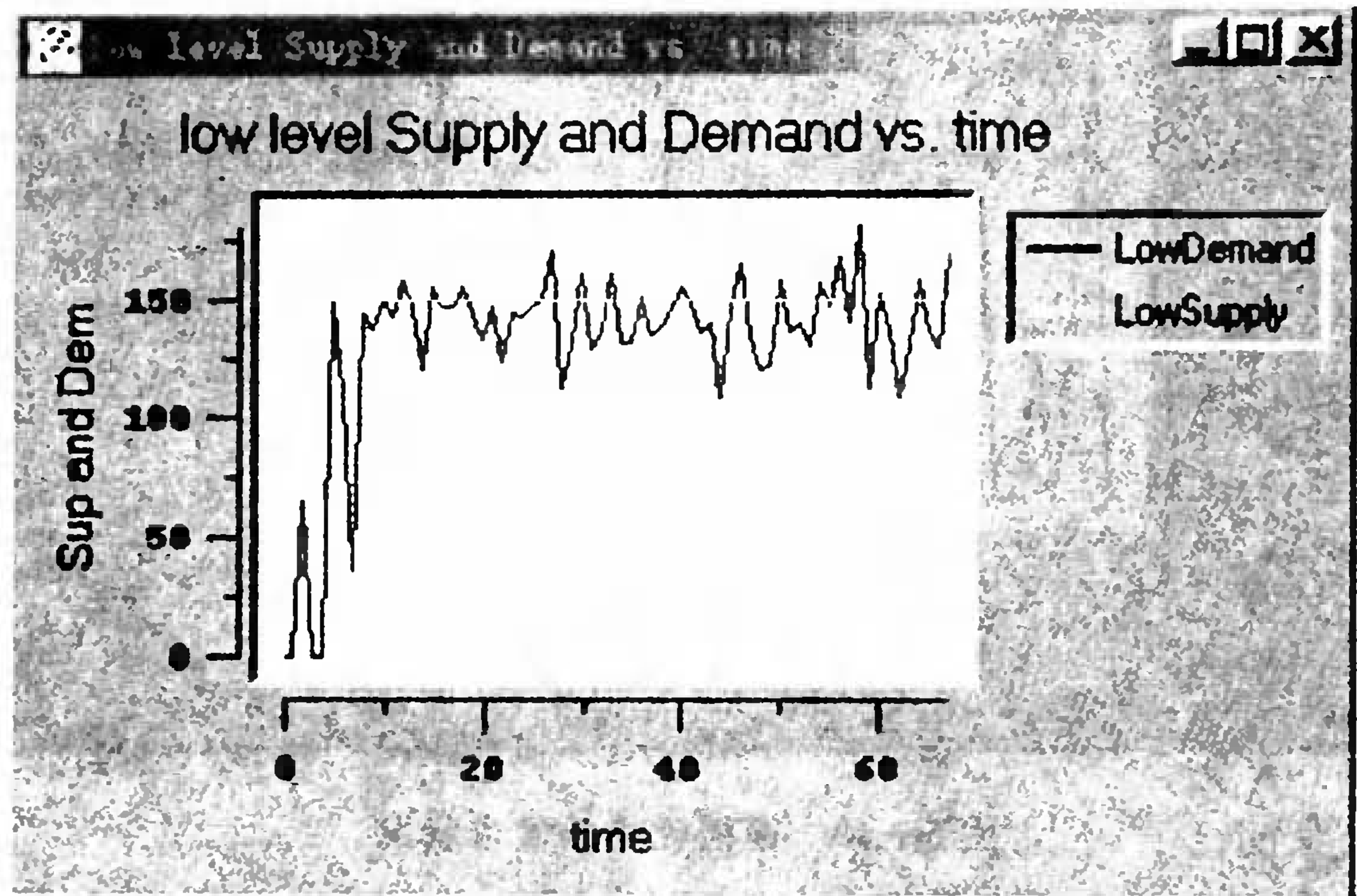


图 5—38 供应水平为 150 时的供需关系

可以看到，这个时候供求是比较均衡的，这也是政府决策部门可以参考的一个合理的量。

此外，我们看一看中档和高档设施的供求状况，如图 5—39 和图 5—40 所示。

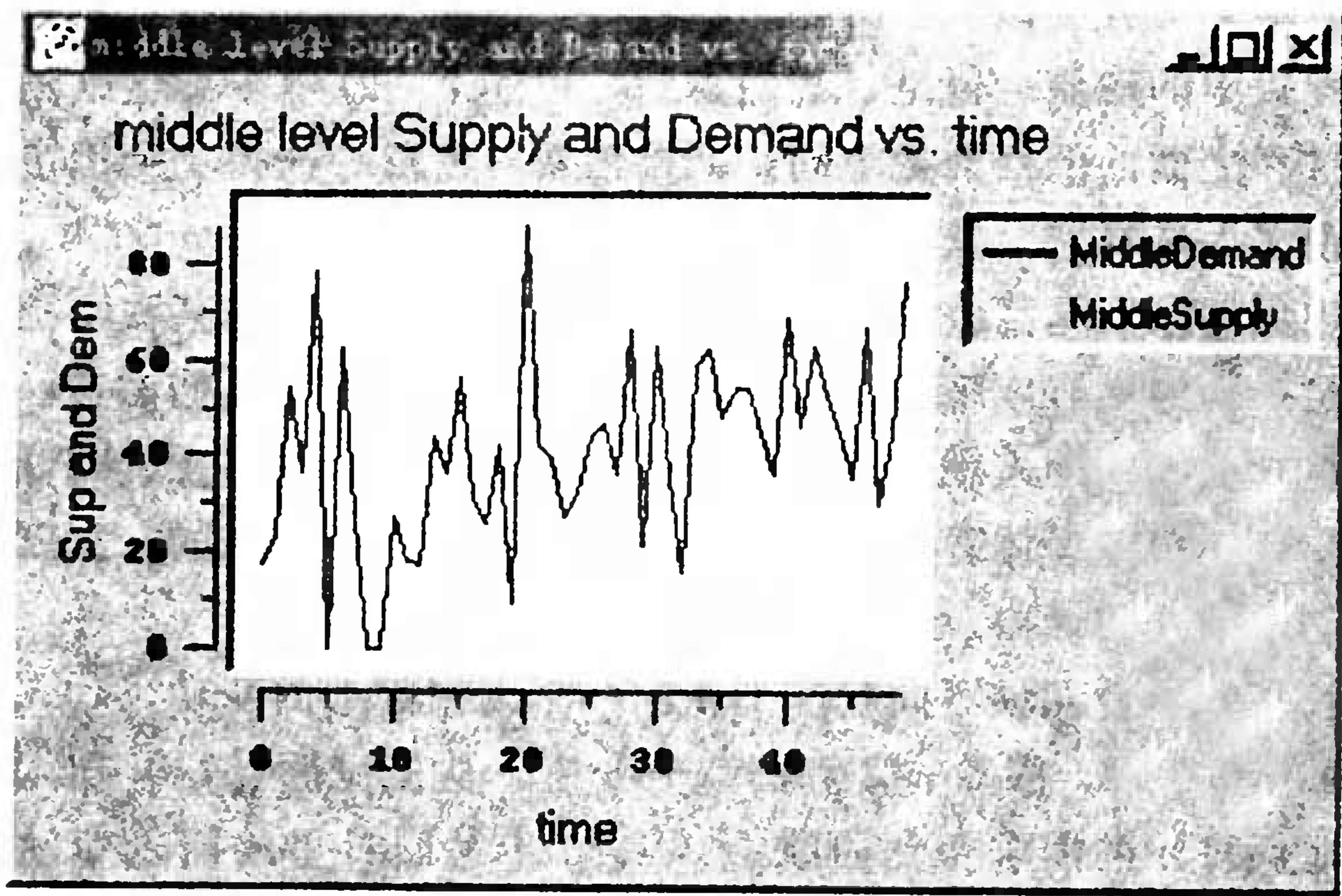


图 5—39 中档设施的供求状况

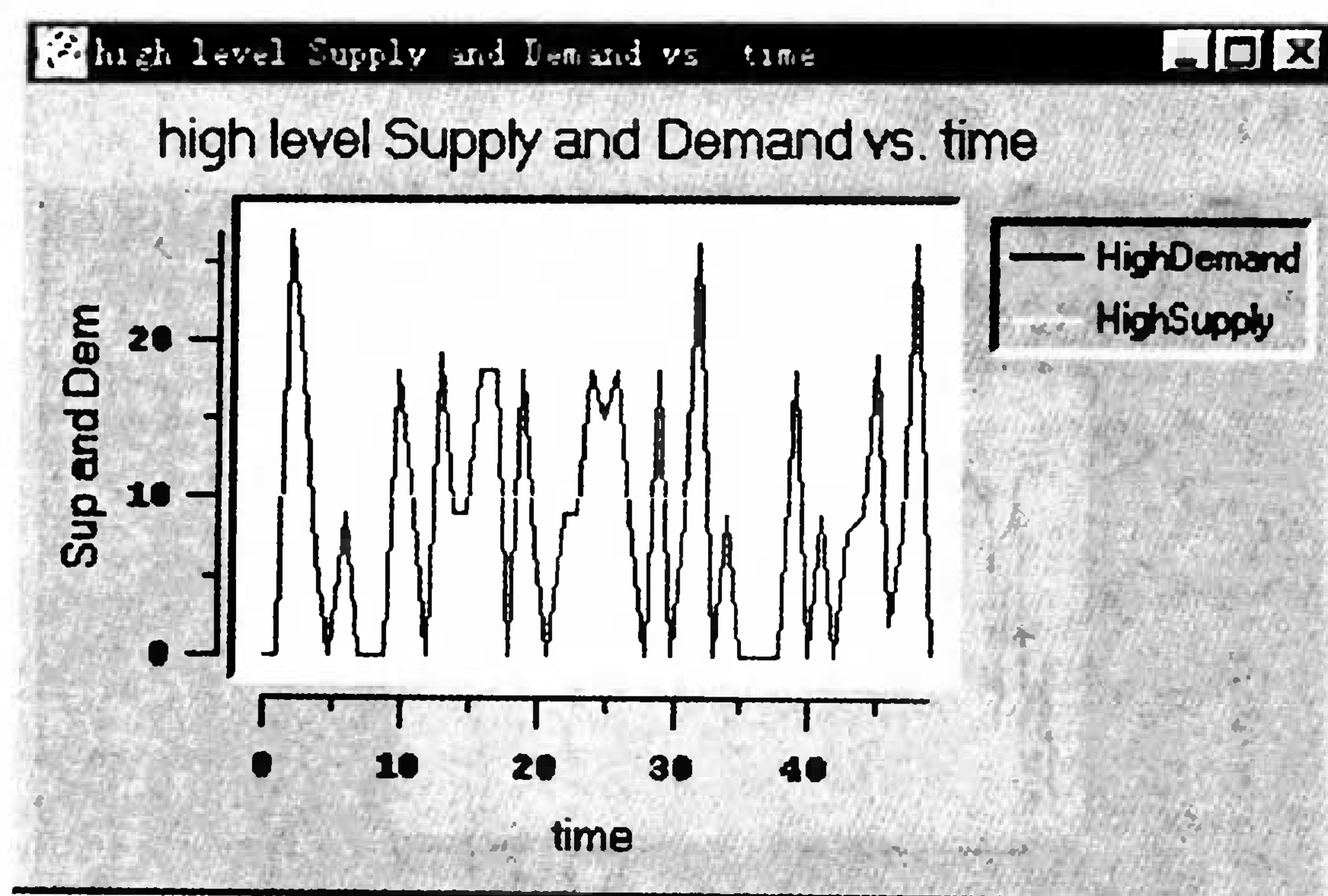


图 5—40 高档设施的供求状况

从图 5—39 和图 5—40 中，可以发现目前中档体育设施的供给是有些偏多的。这在现实中得到了事实的支持：很多保龄球馆、较好的台球厅因为一哄而上，造成现在顾客寥寥，明显地存在供大于求的情况。

同时我们看到，高端设施的消费具有一种很强的波动性，呈现锯齿状的需求曲线。这其实也是有事实根据的。因为本来这种档次的供给就少，而高级白领的生活方式又十分相似，平时都非常繁忙，假期又比较集中，所以造成一下子需求过度集中的现象。但是，我们看到，可能下一次需求就会跌到谷底，波动极大，这和上面的低档消费不同，低档消费即使前一次得不到满足，下一次还是会有很多人选择它。波动不会那么剧烈。

以上现象的原因是高收入的人群选择面很宽，一旦他的某种高档消费需求得不到满足，他的满意度下降以后，下一次他可以选择中低档消费，这是完全可以的。但是低收入的人就没有这种自由，即使前一次的满意度减低了，但是下一次只要他还想选择体育休闲活动，那么就只能选择低档的。这就是两种档次活动波动性不同的缘由。收入成了一个决定性的因素。

下面我们来看看几种不同状况下在同一张图中需求的变动。

下页的图 5—41，图 5—42 和图 5—43 中，从横坐标看，0—35 步 (step) 是平时 (非假日) 的需求变动曲线，36—70 步是假日里的需求变动曲线，71 步以后是假日里实行了带薪休假制度时的需求变动曲线。

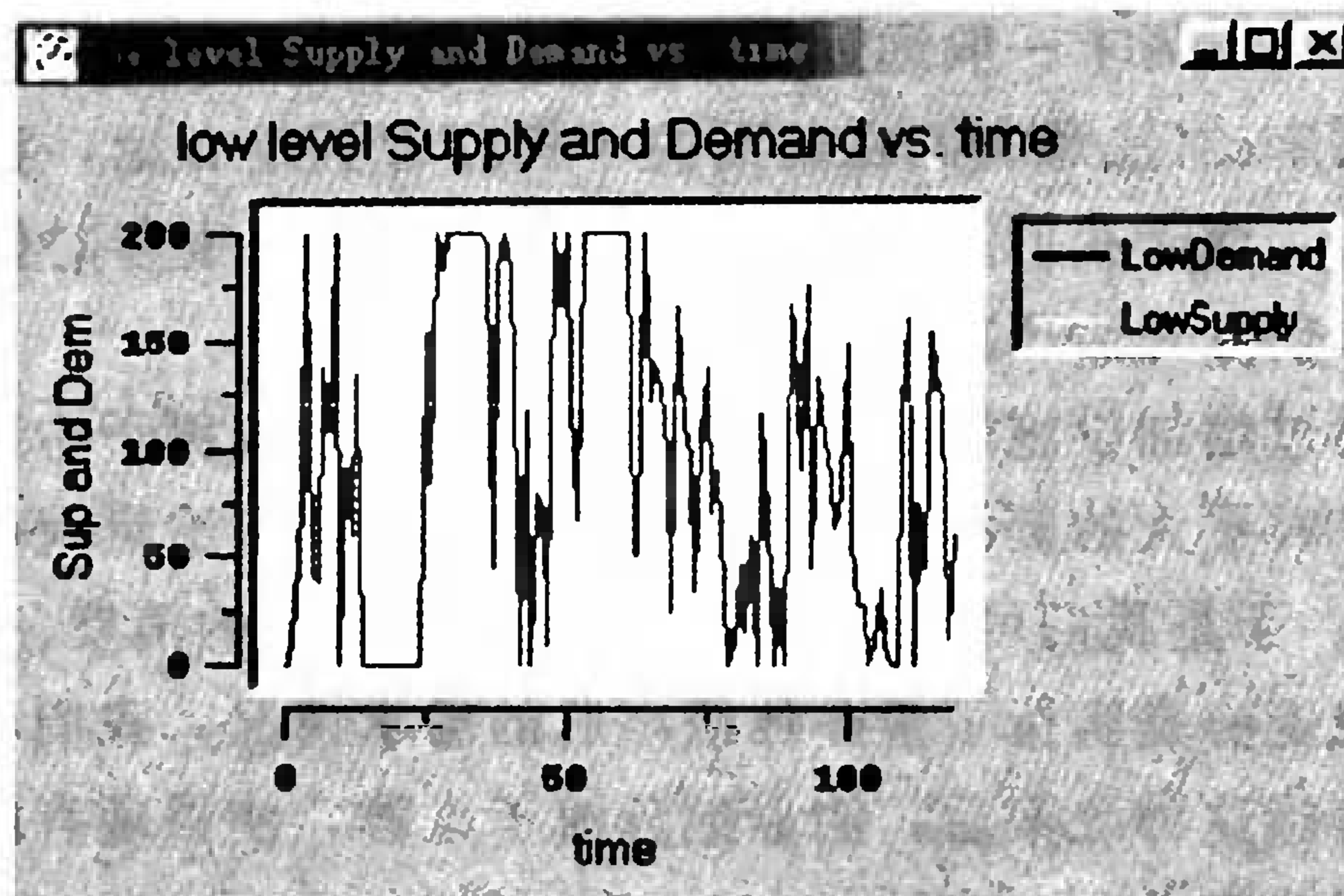


图 5—41 低水平供应和需求变化

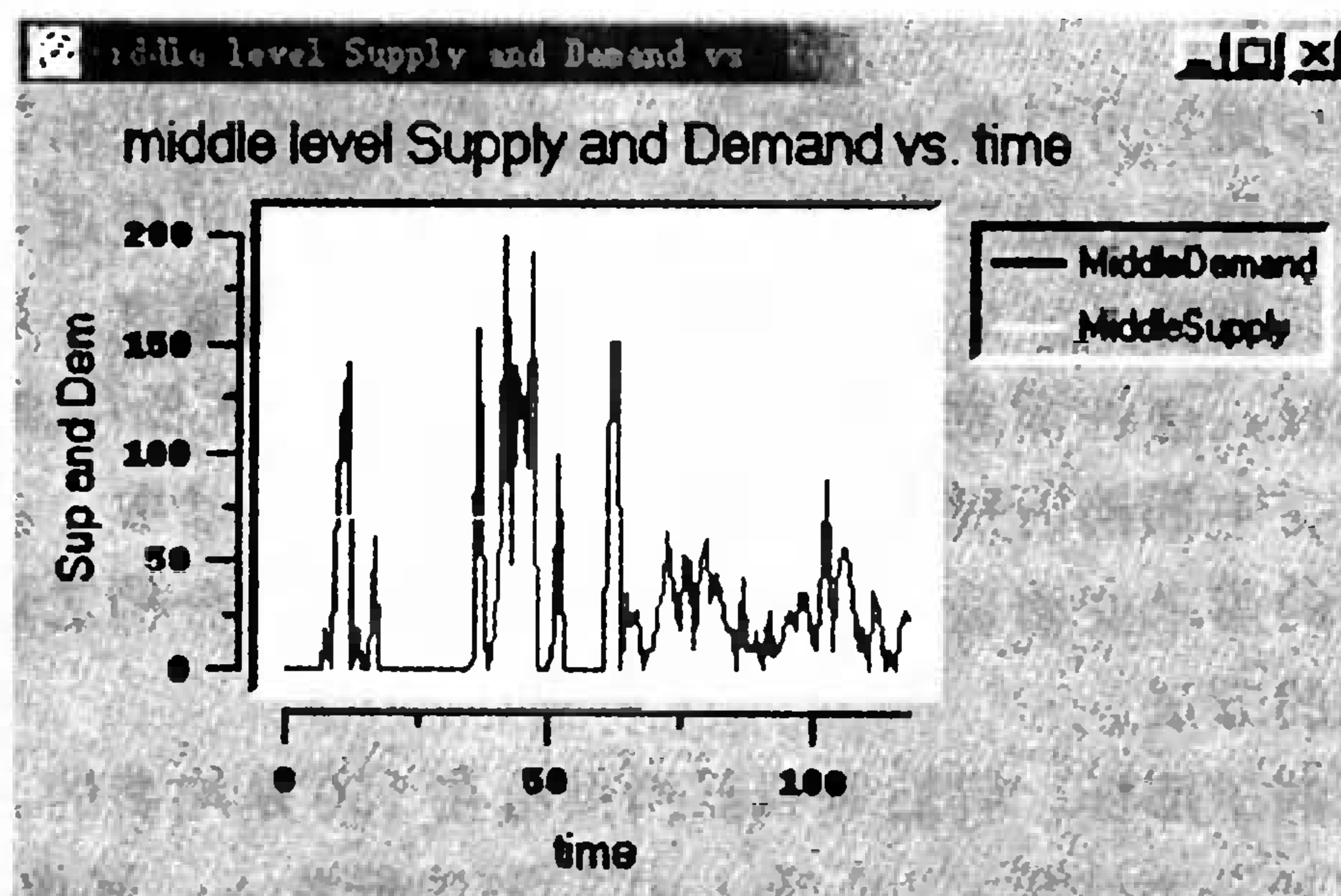


图 5—42 中等水平供应和需求

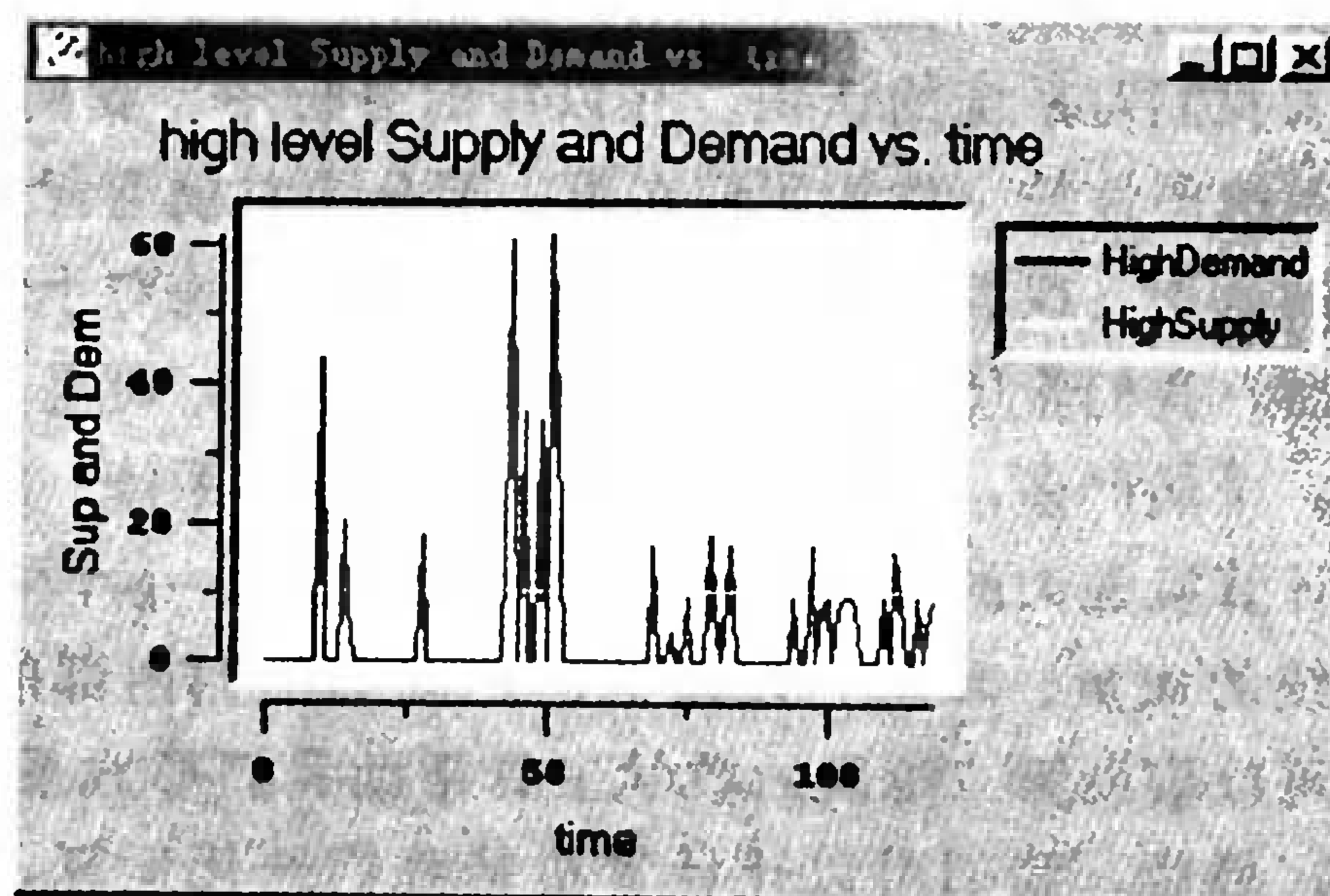


图 5—43 高水平供应和需求

我们看到，平时需求一般远远低于供给，很少会有集中消费，这些集中消费一般发生在周末。（注意我们在前面关于模型背景的介绍，我们的假日专指五一、十一长假，周末我们算作平时。）而到了假日，很多时候供不应求，低档设施供不应求现象尤为严重。

我们可以通过增加设施供给来解决矛盾，正如上面例子中提到的那样。但是这样会造成平时更大的资源浪费（即使是现在，其供给量就已经很大了，更不要说再增加）。于是我们可以在政策上分流这些集中的消费。

后面的曲线走势是实行了带薪休假以后的需求情况。我们可以看到，对于中高档消费，实施这种政策后，明显地分流了人群，使得现有的供给能够较好地满足假日的消费需求。

可是，对于低档消费，这种政策并不特别有效果，还是要适当地增加一些这种档次的设施供给。

到底增加多少呢？可以像上面的例子中那样通过修改供给参数来试验。需要注意的是，可能最后的结果是和统计方法得到的结果很接近，但得到的途径有很大差别。我们修改了一个供给量，因为会影响到满意度，从而影响下一次的决策行为。而且，这种满意度的变动会使高收入者在低中高三档消费中选择，中等收入者在中低档消费中的选择，所以改变一个参数，会涉及所有供需变化。三个档次的需求变动是一个整体。它区别于那种分档之后就进行局部研究，再整体汇总的方法。

正像第一个例子那样，我们看到低档供给在 150 是均衡的。可是如果分析一开始我们的统计分类结果，200 个人中 70% 的低收入，好像 140 是均衡的。这中间相差的 10 个单位在总量是 200 单位的情况下，还是相当显著的。

从上面的分析我们看到，在经济活动的研究中，计算机模拟实际上是在更直观的量上深化了我们对系统的认识。在以往的分析中，我们通过文字描述，只能概括地说明系统的性质（就像我们在第一部分中对模型背景的描述一样），不能得到太深刻的认识。或者说我们能够诉诸笔端的只是对于经济系统不充分的一个描摹。而后，我们希望用数学的方法将之形式化，可是又发觉现有的数学工具力不从心，虽然严谨，但是刻画不了这些复杂的系统。终于有了计算机模拟技术，利用计算机强大的计算功能，我们能够从第一阶段得到的一些语言化地认识抽象系统的成员、环境，以及他们之间和他们内部的交互作用，等等，然后，我们可以借助第二阶段的数学工具帮助我们形成系统成员（主体）的行为规则函数，最后，我们可以让计算机帮我们迭代运算，我们可以观察到，哪些是我们预料到的，哪些是出乎我们意料的。对于出乎意料的结果，我

们要检验合理性，并根据它来修改模型。（比如模型结果数据和现实极为不符，我们就要检查是行为规则定义错误，还是原始数据不能反映实际，而导致迭代结果出现大的偏差。我们这个模型的结果还是可以得到现实支持的。）同时，我们也可以通过修改一些参数，来观测我们想要实施的行为有有一些什么后果，以指导我们的行为决策。

综上所述，计算机模拟比原有的经济分析更进一步，它可以更形象、更量化地反映经济系统，不再是只谈大原则，不能在实际中指导实践。也不会是面对复杂系统一筹莫展，而只能较为宏观地把握。

七、牛奶配送模型

（一）问题描述

在现实生活中常常会遇到任务分配问题。如果一项任务由多人完成，那么，如何在多人之间分配任务是一个非常现实的问题。通常情况下，由于这些人的自身条件不同，因此完成不同工作的效率也不相同。此时，有必要将任务的不同内容具体分配到不同的执行者，以达到最高的工作效率。

这里，我们以牛奶公司的例子为例进行具体说明。假设有一个牛奶公司负责一个特定社区内居民的牛奶供应。该公司拥有若干送牛奶的工人，分别居住在社区内不同的位置，他们负责将牛奶发送到居民家中。每天，牛奶公司首先用汽车将牛奶（成批）送到这些工人家里，然后这些工人再将牛奶送给居民。如果不进行特定的任务分配，这意味着对于某个给定的居民家庭来说，由哪个工人将牛奶送来是随机的，此时的工作效率明显是很低的。因为每个工人在完成自己的任务时所走的距离可以看做成本，如果任务分配得当——例如每个工人负责为离自己自己居住位置相对较近的家庭送牛奶——可以减少这些工人完成每天的工作所需要走的距离，也就是实现较高的工作效率。这个模型的目的就是通过演化的算法（遗传算法）找出最有效的任务分配模式。

（二）模型实现

我们使用经典的遗传算法实现这一模型。

首先，假设社区可以表示为一个长度为 m ，宽度为 n 的矩形区域。并且假设牛奶公司的客户均匀分布在社区内。假设公司有 k 个工人，他们居住的位置分别表示为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ 。按照遗传算法的要求，我们需要用一个代码串来表示一种任务分配的模式。一个任务分配的模式就是该问题的一个解，我们的目的是找到使得所有工人每天行走的距离最小的解。这里

我们用一个长度为 $m \times n$ 的 k 进制数字串来表示一个候选解，数字串中的每一位数字代表了负责为社区内相应位置的居民送牛奶的工人的代码。例如，在一个长度为 6，宽度为 4 的社区内，由 3 个工人负责完成任务。如表 5—5 所示，长度为 6，宽度为 4 的社区，由 3 个工人，坐标格内的数表示负责为该位置的居民送牛奶的工人的代码。

表 5—5 一个候选解

1	2	3	2	1	2
1	2	1	3	2	3
3	2	1	3	1	2
1	3	2	3	1	3

此时，候选解表示为一个 3 进制的 24 位的数字串：123212121323321312132313。在我们的模型中，遗传算法所要求的适应度函数认为与工人完成任务所需要走过的全部距离之和成反比。对于每一个候选解来说，该距离之和的值越小，则适应度越高。每个工人在完成任务时选择路线的原则是从自己居住的位置开始，不断寻找下一个离当前位置最近的由自己负责的居民。例如，图中第一个工人所选择的路线可能是 (1, 1), (2, 1), (4, 1), (3, 3), (3, 2), (1, 5), (3, 5), (4, 5)。其所经过的距离为 13。

在模型初始化阶段，按照给定的参数生成 s 个随机的候选解，分别计算它们的适应度，也就是工人所走的距离总和。然后在每一轮的迭代过程中，不断演化生成新的可行解。生成新的可行解的方法有三种：复制、交叉和突变。复制指的是从原有的一组候选解中挑选出两个加入到新的候选解组中。交叉是指按照一定的概率（交叉率）从原有的一组候选解中挑选出两个并随机选择一个位置，在该位置上将两个解交叉互换，生成两个新的候选解。图便是指按照一定的概率（突变率）在新生成的候选解的每一位上发生改变，用其他有效数字代替该位置上的数字。注意交叉率一般不大于 0.2，突变率一般不大于 0.05。原有的候选解被选中进行复制或交叉的概率是根据各个候选解的适应度而分配的。适应度越高的候选解被选中的概率也就越大。关于遗传算法的具体实现细节可以参看有关书籍。按照遗传算法的理论，适应度较高的候选解中含有具有较高适应度的“基因”——代码段，而通过复制、交叉和突变的方法可以使这些基因保留下来并组合成新的具有更高适应度的解。因此，每一次迭代过程之后生成的新可行解的平均适应度会不断提高。经过反复的迭代过程，有可能找到具有最大适应度的解。

对上述模型的算法，我们用 Swarm 平台来实现，并观察每次迭代之后新候选解的平均适应度和最大适应度及其分配模式。

(三) 结果分析

在运行模型时我们采用了不同的参数。下面给出的是一组典型的参数： $m=10$ ， $n=10$ ， $k=2$ ， $s=300$ ，交叉率=0.2，突变率=0.03，迭代次数为5 000次。

在运行的过程中，可以看到每次迭代后的平均适应度基本上呈现出先不断上升，然后逐渐趋于稳定的发展过程，如图 5—44 所示。

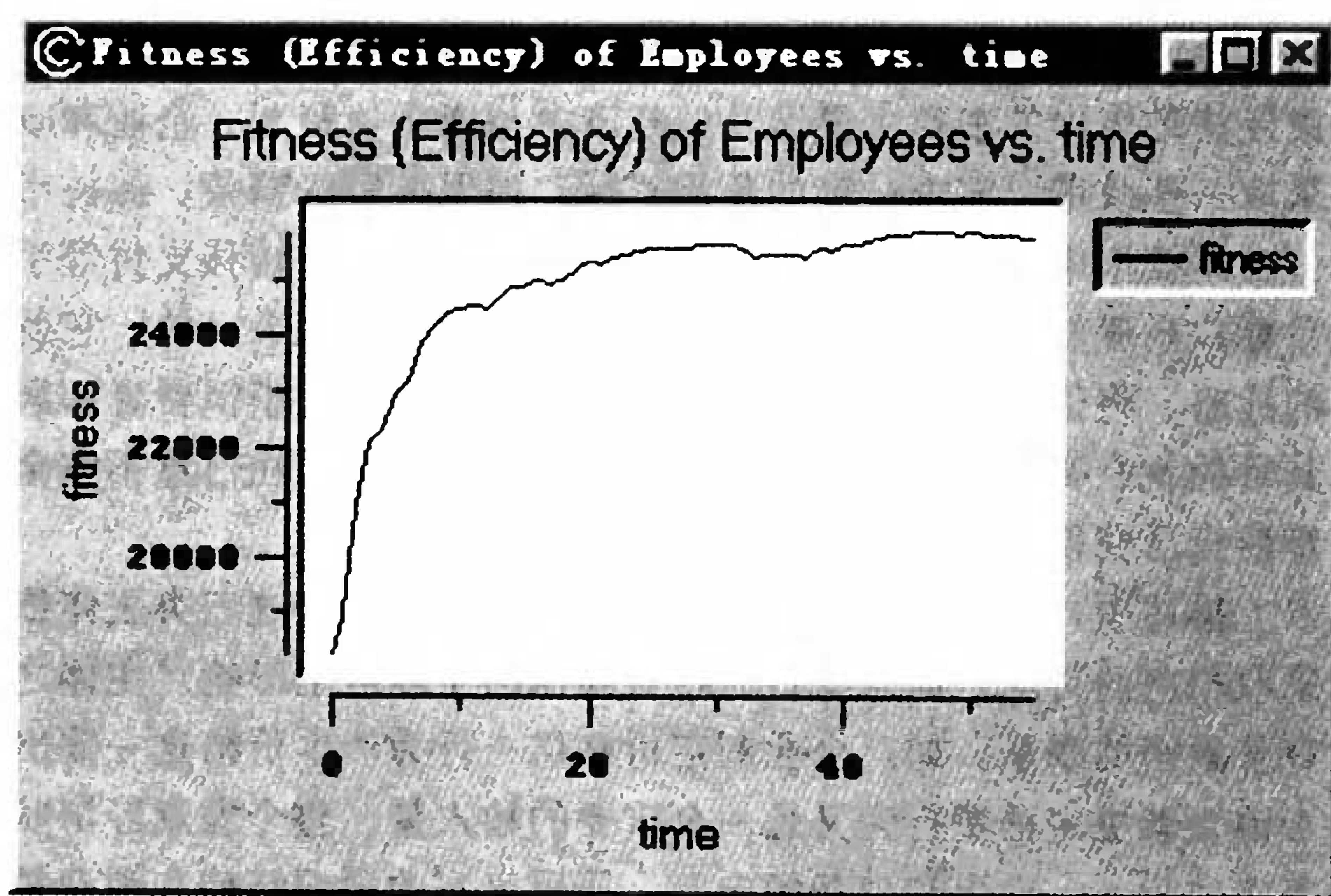


图 5—44 任务分配模型中的适应度发展过程

这个模型虽然很简单，但是具有一定的实用性。如果将社区表示为有向图的方式，将距离表示为有向图上各个边的权重，并在路线选择上用遗传算法加以实现，那么该模型就非常接近于现实生活中各种配送系统的模式，从而得到广泛的应用。

八、消费与物价模型

(一) 问题及背景的描述

1. 本模型反映的是宏观的国民经济环境中居民家庭的消费子系统

一般来说，消费者的消费会受到诸多条件的影响。影响居民消费的因素非

常复杂,包括:经常收入、先前收入、永久收入、过去的储蓄、借贷能力、利率等。按照收入状况、年龄、所处地域等条件分,可以把消费者分成很多类,每类消费者各有不同的消费偏好。但是即使同一类消费者,甚至每个消费者在不同时刻也会产生不同的行为。我们要研究的就是,在大的国民经济环境中,消费者的行为与主要的影响因素之间有何关系。在把消费者、企业乃至政府都当作 Agent,就像现实世界那样相互作用时,我们希望模型能如实地反映出现实生活中的经济现象,这样我们就可以在计算机模型所提供的这个实验室中研究经济环境和环境中主体的行为规律,为在现实生活里更好地把握经济规律,科学地制定政策和经济预测提供一个依据。

2. 模型所要反映的是如下所述的一个关系

国民经济环境中的消费主要涉及的经济参与者是消费者、企业和政府。政府需要采取一些政策以实现一定的政治目标,如保持经济繁荣、保持市场价格稳定等。在本模型中,政府主要靠调节税收和政府购买、转移支付等手段来完成这些目标;企业的行为就是为了利润最大化,而为了这个目的,它就需要制定合理的战略,将价格、库存调整到一个合理的水平;对于消费者即居民家庭来说,其目的就是要选择一家价格较优的企业购买产品,在信息不完全的状况下,尽量使自己获得的效用最大化。

从以上描述中,我们可以看出,消费者、企业和政府这三类主体依据各自的目的采取相应的行为。而这些行为将对其他的主体产生影响。主体之间相互独立又有着紧密的联系。如,企业制定价格这一行为产生价格这一输出量,而价格对于消费者决定消费行为又是一个重要的输入量。整个宏观经济状况制约了居民家庭的收入、支出和消费倾向等,居民家庭的消费结构和消费量从而发生相应的变化。而居民家庭群体消费行为的变化反过来又会影响生产厂家的盈利和政府的宏观决策,即反作用于宏观的经济环境。

建模方法采用自下而上的基于主体的自适应方法。整个宏观经济环境的变动是与其中适应性主体间的相互作用密切相关的。自适应主体根据周围环境的变动不断地调整着自身的行为,反过来,自适应主体的行为又对环境产生反作用。我们在模型中定义的自适应主体(政府、生产厂家、消费者)的行为规则可以根据主体自身的需求不断调整,从而体现了主体的适应性。

在主体行为的定义上,我们借鉴了传统 CGE 模型中关于宏观居民消费的函数关系,定义了本模型中居民家庭的消费函数。这种做法也体现了前文第三章中的看法,即基于主体的建模方法可以与数学模型有机地结合起来的。

本模型紧密结合了中国当前的实际情况,其中居民家庭的收入、主要支出

的数据来源于相关国家统计局的数据。

(二) 模型介绍

1. 基本理论假设

为了更加简明地阐述主要问题，我们做如下假设和忽略。

首先，一般来说，居民的支出应包括储蓄、投资和消费，而在本模块中仅仅研究其中的消费。模型假定居民的收入有保障，突出考虑消费结构的变化，忽略了消费者为今后生活的积蓄等其他行为。即，假设居民的收入完全用于消费。

其次，假设我们研究的是一个封闭的国内市场，忽略国际市场的影响。

再次，本模型研究的重点是消费而非生产，因此不妨假设商品生产者的资本足够多，不考虑生产者退出和进入市场。并且假设同类厂家生产的商品没有质量的差异。

最后，由于时间有限，本模型所研究的消费品不像传统那样分为七类（食品消费、衣着消费、家庭设备用品及服务消费、医疗保健消费、交通通讯消费、娱乐教育文化服务、居住消费），而是有代表性地选取了日常易耗消费品和食品进行研究，其中对食品又分为烟酒（根据我国的实际情况，政府会对此类商品征收消费税）、粮食和其他食品。如果要全面地反映商品的消费情况，还应在今后的工作中加入其他种类的消费品，并对目前模型中的其他食品类和其他日常易耗商品类进行细分，这些商品有着自己的参数，但是基本方法与目前模拟的四种商品相似。

2. 模型的运行机制

政府、企业、消费者这三类主体按照各自的行为规则，通过企业利润、消费税、转移支付、消费品价格和消费数量这些因素相互作用相互影响。目前，在模型中假设有一个政府，两个企业生产其他日常易耗消费品，两个企业生产粮食，两个企业生产烟酒，四个企业生产除粮食和烟酒外的其他食品。消费者暂设为 100 个。

政府根据市场上企业的盈利来判断当前经济的繁荣状况，根据消费品的价格指数来判断市场价格是否正常，并据此制定消费税和转移支付。

按照政府的税收政策，消费者消费除了价格还要额外支付一笔消费税（烟酒类）。消费者根据生产消费品企业的定价选择生产消费品的企业，按照自己的消费倾向、收入、对消费品的最低需求等因素综合地决定对各消费品的消费量；企业则根据自己当前产品的销售情况、库存情况、价格水平和市场需求，以利润最大化为目标来决定产品的定价和生产量。

这样，在政府、企业和消费者之间就形成了一个相互制约相互作用的“大环”。

此外，详细地分析企业和消费者的关系，还存在着如图 5—45 所示的一个“小环”。其中，企业的定价是影响消费者边际消费倾向的一个因素，而消费者边际消费倾向的变化会直接改变消费者的消费数量，即企业的销量。进而影响企业的利润，企业为了追求利润最大化又会相应地调整定价和供给量。

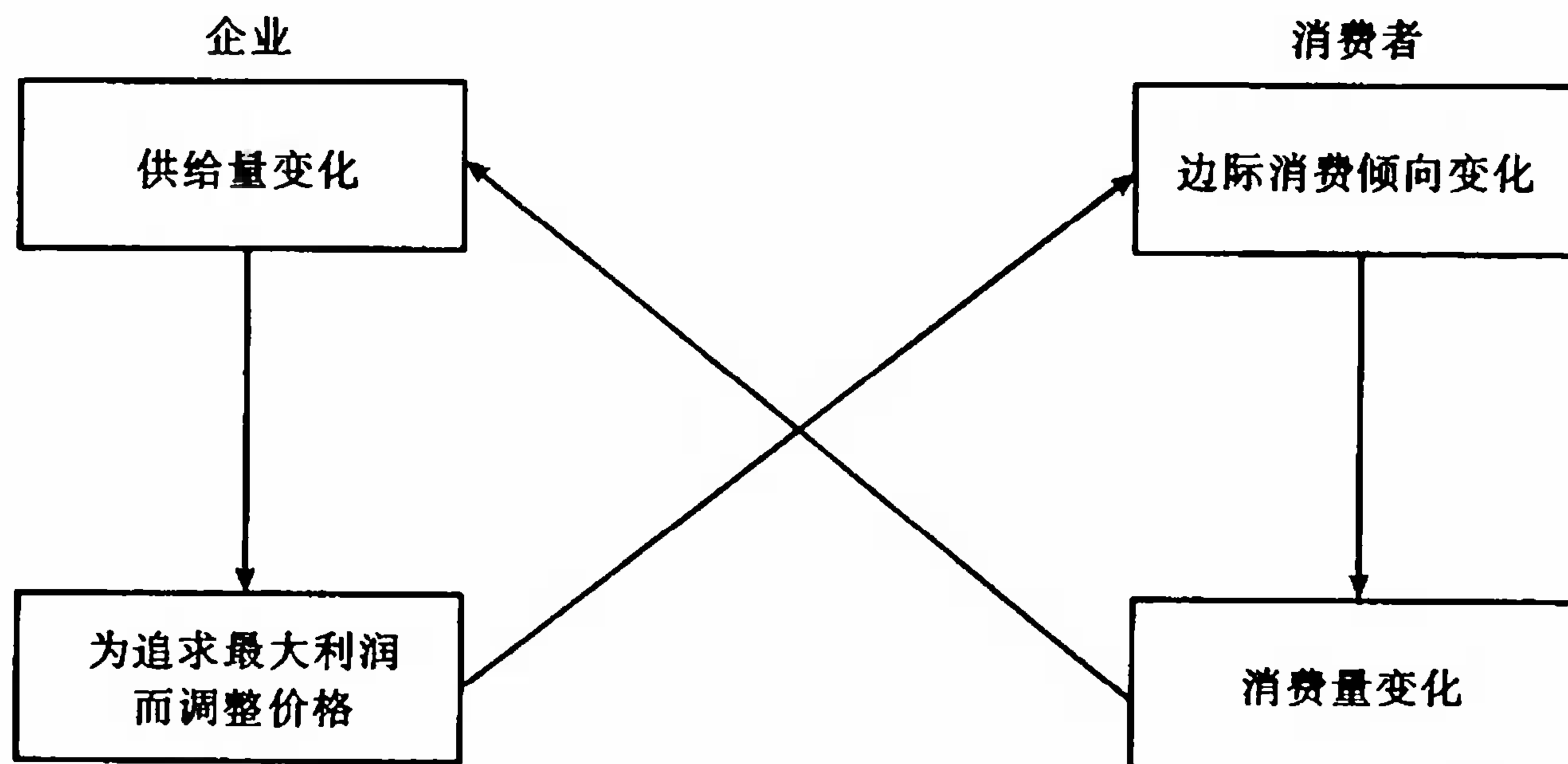


图 5—45 企业和消费者

这里为了更真实地模拟现实中信息不完全现象和消费者的学习过程，模型假设消费者的消费行为是逐渐学习、逐渐完善的。在初始状态把不同收入的消费者的消费倾向设为相同，随着时间的增长，消费者的消费倾向将通过自己消费行为所带来的效用反馈而得到不断的调整。同样地，企业也会从自己原来的策略对利润造成的影响中学习，逐渐调整策略，使得企业的利润最大。整个消费模块的宏观规律就这样在主体的相互作用和不断学习中涌现出来。

3. Agent 的描述

模型中包括三类主体：政府、企业（生产者）、居民家庭（消费主体）。下面依次详细介绍这三个主体。

（1）政府。

概述：政府负责国民经济的宏观调控。它按国家经济发展的需要制定消费税率，从而间接地调整商品的生产和消费。本模型模拟的是我国经济的发展方向——市场经济，因此，政府在模型中只起到宏观调控的作用，不直接干预市场，商品的供求完全由市场规律控制。

一般地，政府宏观经济政策的目标包括充分就业、价格稳定、经济持续均

衡增长和国际收支平衡。在本模型中经过简化, 仅仅考虑价格稳定和经济繁荣。其中, 价格稳定以价格指数的相对稳定, 即不出现通货膨胀为描述, 经济繁荣以生产企业的盈利达到一定水平为描述。

根据当前我国消费税的征税范围规定, 由于本模型仅考虑食品和其他日常易耗消费品的消费情况, 假定政府只对烟酒类消费品收消费税。

实现: 政府的行为是每隔一段时间检查价格是否稳定, 经济是否稳步发展。通过税收、政府购买和转移支付行为实现宏观调控的目的。

首先, 从前期的市场价格计算价格指数, 如果市场价格指数偏高, 则调整提高消费税, 反之, 降低消费税。

然后, 根据企业的盈利情况判断经济的发展情况, 如果经济不景气, 则增大政府购买, 增加转移支付, 降低税收, 用以刺激消费。

(2) 生产者。

概述: 生产者负责供应商品。企业的目的是利润最大化, 受居民的消费量、库存情况、市场需求和市场平均价格等因素的影响, 它要制定一个合理的价格和库存策略使自己能够获利。因此, 生产者要获利就要从市场的规律中学习调整价格。

企业按所生产的消费品分为四类: 生产烟酒的企业、生产粮食的企业、生产其他食品的企业、生产其他日用易耗品的企业。

实现: 生产者的利润 = 价格 × 销售量 - 成本。

企业的最初定价是根据生产成本和计划销售量制定的。这里企业根据上一期的情况进行本期的定价, 并制定生产量的决策, 而没有聪明地对更长期的经验进行分析, 也没有考虑一个企业的策略制定会对别的企业的策略制定产生何种影响。这样一方面是为了使模型简单, 更加突出反映消费问题, 另一方面也是因为以前各期的库存、价格等都会影响到后期的状况。当然, 在今后的工作中将博弈理论引入企业的制定策略行为可以更加接近企业的实际行动。

(3) 消费者。

概述: 消费者的主要行为就是根据收入、商品的含税价格、边际消费倾向等因素改变其消费量。各类居民的收入不同, 边际消费倾向不同, 有其各自的消费行为方式。

由于假设各厂家生产的商品质量无差别, 消费者主要根据商品的价格来选择商品。而消费者在多轮的消费行为后, 能够学习逐渐调整自己消费的行为来改变自己对各种商品的消费倾向。

不同的消费品的需求弹性不同, 则价格和消费税对其影响也不同。消费者

消费量的计算在这里借鉴了传统 CGE 模型的有关消费函数。居民在开始对市场信息掌握不完全,通过多次消费行为后,居民逐渐学习到较为完全的信息,并据此调整自己的行为。具体是用机器学习算法 LCS (Learning Classifier System 分类器学习系统) 算法来实现居民的这种消费学习过程,并调整消费倾向。

值得考虑的是,在计算消费者的学习过程时,必须要定义一个适应度函数来表示消费者对消费品的满意度,问题是这个满意度应该如何表示。

我们在模型中采用了三个变量来共同反映消费者的满意度:边际效用、消费结构比和产品性价比。

► 边际效用

效用是指从消费一定量某物品中所得到的满意程度。效用的大小是人们享受商品的主观感受,因而没有客观量化的标准来衡量。不同商品,对不同消费者,其满足程度是不同的,但就一般意义而言,高收入消费者显然比低收入消费者更愿意购买奢侈品,而低收入者更加倾向于消费维持生活必需的用品。为了能够衡量不同商品对于不同消费者的边际效用,我们在程序中建立了一个表结构来表示边际效用。

► 消费结构比

按照世界经济学界所公认的恩格尔定律,在人们的消费结构变化中存在着一规律,即一个家庭收入越少,这个家庭用来购买食物的支出所占的比例就越大,反过来也是一样。而这个家庭用以购买食物的支出与这个家庭的总收入之比,就叫恩格尔系数。对一个国家而言,这个国家越穷,其恩格尔系数就越高;反之,这个国家越富,其恩格尔系数就越低。

我们在这里可以借鉴恩格尔系数的概念,来研究消费者的消费结构比。由于在模型中我着重模拟的是不同种类食品的消费分布,所以我建立了一个变量来反映低档食品(如粮食)在整个消费支出中的比例,这个变量我不妨称之为消费结构比。当消费者的收入越少时,这个消费结构比就越高。这个数借鉴了恩格尔系数的思路,但与恩格尔系数有差别。消费结构比可以用该消费者当前对低档食品的消费与总消费的比值来表示。

► 性价比

由于在模型中假设消费者的收入无风险、无储蓄的要求,即当期收入在当期尽量花完,那么对于消费者来说,当然是希望用所有的可支配收入买到效用最大的消费品。换言之,用固定的可支配收入买到对消费者最具有价值的消费品。不考虑前面两种因素,基本上可以说,消费者消费的商品的性价比越高,

消费者越满意。这里近似地用消费者本期购买到的消费品的成本与此消费者购买该种商品的平均价格之比来表示本期消费性价比。

在系统每一轮的运行中,消费者要分别计算自己对模型中各种商品的消费倾向。模型如上所述给定了消费者学习调整消费行为所要考虑的三大因素:不同商品对不同消费者的不同边际效用、在本轮模型运行中消费者所购买到的该种商品的性价比和消费者购买该种商品的行为对该消费者本人的消费结构系数所产生的影响。

(4) 实现。

居民家庭(消费主体)是本模型重点描述的 Agent,模型可以较好地模拟 100 个消费者。

本模型基于国家统计局 1999 年的统计数据,按照各地区居民收入的差别,分别选取了我国三个有代表性地区的居民消费情况进行研究。居民家庭来自三个地区:上海、重庆、河南。这三个地区的居民收入分别处于当时全国最高、中等和最低水平。

现在将其行为规则描述如下:

首先,三类居民根据生产厂家的定价来选择一家最合适的厂家。用如下公式来确定选择某企业的概率。

假定企业 f_i 的报价是 p_i ,则家庭从 f_i 购买消费品的概率是:

$$P(f_i) = \frac{p_i^{-q}}{\sum_{j=1}^n p_j^{-q}}$$

式中, q 是家庭对这种消费品的需求弹性,用来表示家庭对价格的敏感程度。显然, q 越大,价格高的消费品被购买的概率越小,价格敏感程度越高。

这意味着,一个公司的价格相对于其他食品公司越低,家庭从该食品公司购买食品的可能性就越高。

然后,消费者根据消费品对自身的满足情况,优化消费行为。

先定义一个适应度函数,与消费品满足居民的程度相关,不同的消费品对居民的满足程度不同。消费品满足居民的程度越大,此适应度函数越大。

对于单个消费者来说,他对消费行为的满意程度没有一个既成的衡量标准,但是一般来说,当他以一定的价钱买到总效用和性价比越高的商品,他的消费结构比越低,他就越满意。这里我们构造了一个消费者满意度函数:

$$\begin{aligned}\text{消费者的满意度} &= a \times \text{边际效用} + b \times \text{性价比} - c \times \text{消费结构比} \\ &= a \times \text{marginalUtility} + b \times \text{cost/price} \\ &\quad - c \times \text{lowFood/totalGoods};\end{aligned}$$

这里的 a , b , c 是根据三个因素对消费者满意度的影响而给定的系数。

消费函数的边际消费倾向参数的变动有三种可能：变大、变小、不变。给这三种可能以三个概率矢量，按这概率矢量决定是增加，还是减小或保持消费函数的边际消费倾向参数。

消费者每次消费后，用变量记录下当前状态下的满足程度，并用前述的适应度函数来计算本次满意度是否变大。根据适应度函数的变化，消费者学习到自已前次调整边际消费倾向的策略是好是坏，然后以增大适应度为目标，相应地改变本状态下的概率矢量。

消费者首先要判断自己处于下面三类状态的哪一种。

本轮的边际效用比上轮增加还是降低了（增加取值 1，降低或保持取值 0）。

本轮的消费结构比（STRUCTURE）比上一轮的消费结构比是升高了还是降低了（升高取值 1，降低或保持取值 0）。

本轮的性价比比上一轮的性价比升高了还是降低了（升高取值 1，降低或保持取值 0）。

这样，消费者就会进入到八个状态中的一个（000，001，010，011，100，101，110，111）。

对于每个状态，消费者会产生相应的调整消费倾向的策略。在模型的假设条件限制下，每个消费者有四种消费倾向：粮食消费倾向、烟酒类食品消费倾向、其他食品消费倾向、其他商品消费倾向。可以用这四种消费倾向的变化组合来构造消费者调整消费倾向的策略。

这里用四位三进制的数字来表示消费者在一种状态下的策略。用字母 t , m , l , o 来分别表示某消费者的烟酒类食品消费倾向、其他食品消费倾向、粮食消费倾向、其他商品消费倾向。每种消费倾向的取值为 0 表示消费倾向增加、取值为 1 表示消费倾向不变、取值为 2 表示消费倾向降低。利用如上所述的编码机制，考虑到去掉三种消费倾向同时增加和降低这两种策略，要去掉 0000 和 2222 这两种策略，这样共有 $3 \times 3 \times 3 \times 3 - 2 = 79$ 种策略。对于范围从 0 至 78 十进制的策略值，只需将十进制数字加一再转换成三进制数，就可以得到范围从 0001 到 2221 的四位三进制数，每位是一种消费倾向的改变策略。例如，如果当前状态下消费者的策略值为 36，可以得到四位三进制数 1101

(36+1 再转变为四位三进制数), 它代表某消费者的策略为保持烟酒类食品消费倾向不变、保持其他食品消费倾向不变、增加粮食消费倾向、保持其他商品消费倾向不变。

在模型中, 我采用一个数组 $nPStates [nCurrentStates][nDecision]$ 来为每个消费者在每个状态下所采取的每种策略的概率。其中, $nCurrentStates$ 表示消费者所处的状态, 其取值为 0 至 7; $nDecision$ 表示消费者的策略, 其取值为 0 至 78。消费者在状态 $nCurrentStates$ 下所采取的策略是用概率向量 $(P_0, P_2, P_3, \dots, P_{78})$ 表示的, 其中, $P_0, P_1, \dots, P_{78}$ 分别表示下一次消费者在同样状态下采取该消费倾向策略的概率。

在每个状态下, 消费者根据相应的概率向量产生一个随机量来判定应该如何调整消费倾向。消费完成后, 判断消费倾向的调整对消费者满意度的影响, 并据此调整概率向量。

最后, 根据其消费倾向、基本需求、生产厂家定价和政府的消费税决定购买量。对于每种消费品, 消费者决定消费量的公式为

$$C = C_{base} + S \times (Income - \sum_i (p_{base,i} (1 + tax_i) \times C_{base,i}))$$

式中, C 表示消费者对某一类商品的实际消费量, C_{base} 表示对这种商品的基本需求, S 表示这个消费者对这类商品的边际消费倾向, $Income$ 是消费者的可支配收入, tax_i 是消费税, p_{base} 表示不含税的产品价格, 共有 i 种消费品。

4. Swarm 程序中对 Agent 时间序列的安排

为模型的建立所选择的 Swarm 平台较好地支持了 CAS 理论, 它提供了大量可被建模者引用的工具包, 能够对复杂系统中的 Agent 行为的建立提供良好的支持。Swarm 平台要求在建模时对各 Agent 规定一个行为序列 (Schedule), 整个模型就按这个行为序列一步一步地运行下去。本模型中 Agent 的时间序列如下:

(1) 政府计算消费税: 首先政府检查价格。如果价格偏高, 则提高消费税 (价格的值按价格指数判断)。根据我国实际情况, 政府只对烟酒类食品征收消费税。

(2) 政府计算政府购买和转移支付: 政府根据企业的盈利情况判断经济的发展情况, 如果经济不景气, 则增大政府购买, 增加转移支付, 降低税收, 用以刺激消费。反之, 按概率保持或减小政府购买、转移支付, 增大或保持税收。

(3) 企业计算生产量和定价：生产者根据产品的销售数量、价格、库存情况和市场需求，以利润最大化为目标制定本期生产量和价格。

(4) 消费者购买：消费者按顺序对四种商品消费，然后根据消费所带来的满足程度调整自己对不同消费品的消费倾向。这些学习行为都采用 LCS 算法来实现。

5. 模型的参数设定

为了让这个模型具有一定的现实意义，我们把模型参数与实际数据紧密地结合起来。其大部分参数是直接取自国家统计局公布的统计数据，另外，有少部分参数，如边际效用表中的效用值是参考统计数据计算出来的，消费者的基本消费需求、生产厂家的库存比例等是参考日常经验的估计值。

根据国家统计局城市社会经济调查总队编著的《中国价格及城镇居民家庭收支调查统计年鉴》中 1999 年度第三季度的统计数据，得到表 5—5。

表 5—5 平均每户每月消费该类商品的钱数 单位：元

地区	消费性支出	粮食	烟酒	其他食品	其他易耗消费品
河南	874.387 5	63.205	45.93	247.782 5	517.47
重庆	1 361.057 5	49.095	52.982 5	473.745	785.235
上海	2 061.922 5	65.335	83.877 5	778.865	1 133.845

这三个地区每月的户均可支配收入依次为 1 133.09，1 473.992 5 和 2 732.91，统计全国各地区的收入水平中分别居于最高、最低和中等，具有代表性和可比性。

结合本模型的假设，由于假设居民家庭的收入完全用于当期消费，因此取统计数据中的“消费性支出”为模型中消费者的收入。另外，根据经验给出消费者对模型中几类消费品的基本需求和生产厂家定价的参考价格。模型给定的企业相关参数如表 5—6 所示。

表 5—6 企业相关参数表

消费品	成本	参考价格	参考税收	基本需求
粮食	0.5	1	0	40
其他类食品	5	10	0	23
烟酒类食品	5	20	1	2
其他商品	10	20	0	25

从本模型计算消费者消费量的消费函数：

$$C = C_{\text{base}} + S \times (\text{Income} - \sum_i (p_{\text{base},i} (1 + \text{tax}_i) \times C_{\text{base},i})) \quad (\text{公式 1})$$

可以推导得到消费倾向 S , S 的计算公式为

$$S = \frac{C - C_{\text{base}}}{\text{Income} - \sum_i (p_{\text{base},i} (1 + \text{tax}_i) \times C_{\text{base},i})} \quad (\text{公式 2})$$

将表 5—5, 表 5—6 中消费者的消费性支出, 各商品的参考价格、基本需求和税收的估计值分别代入公式 2, 就可以计算出近似的消费倾向的估计值, 如表 5—7 所示。

表 5—7 消费倾向表

消费倾向估计值	粮食	烟酒	其他食品	其他商品
河南	0.36	0.004 6	0.027 6	0.013 55
重庆	0.016 5	0.001 18	0.044 23	0.025 88
上海	0.02	0.001 75	0.043 84	0.025 3

不同商品对于不同地区的消费者具有不同的边际效用。因此, 在计算消费者的消费行为所带来的总效用时需要根据具体的消费者和商品来计算。在模型中就是以表 5—7 所列出的各个地区的消费者对各个商品的消费倾向为基础, 给出一个边际效用表, 如表 5—8 所示。

表 5—8 边际效用表

边际效用	粮食	烟酒	其他食品	其他商品
河南	0.36	0.092	0.276	0.271
重庆	0.016 5	0.023 56	0.442 3	0.517 6
上海	0.02	0.035	0.438 4	0.506

在计算消费者消费行为的效用时, 消费者对每类商品的消费量与表 5—8 中相应的边际效用相乘的乘积之和就是消费者当前消费行为所带来的总效用。

6. 用 Swarm 建模时需要注意的几个问题

在建模过程中, 我们遇到过一些问题。有必要把这些问题总结一下, 为将来的工作提供一些参考。

(1) 随机数的产生。

在为复杂系统建模时, 为了体现复杂系统中子系统行为的不确定性, 经常会采用一些随机因素作为变化机制。

目前的计算机模拟中用到的随机数都是通过伪随机数生成器生成的。例如, 为模拟一致分布, 随机数算法通常使用同余算法。当使用相同的随机数生成算法并且随机数种子完全相同时, 产生的随机序列是完全相同的。

如果使用缺省的相同的随机种子, 则模型运行结果根据相同的随机序列得

到。因此,若干次的模型运行结果将是相同的,不能实现更为真实的随机效果。甚至有可能由于一组特定的随机序列对模型的结果产生不好的影响,而致模型无法显现出正确的结果。

在 Swarm 中提供了专门的随机种子生成的类。要解决上述问题就有必要用到这些类,让随机算法利用不同的随机种子为模型提供不同的随机序列。我们在模型中采取的方法是利用系统时钟作为随机种子。

(2) Agent 行动的顺序。

构建 CAS 模型中必不可少的一步是定义复杂系统中主体的行为、属性以及主体间的相互作用关系。

在 Swarm 中有一个时间表 (Schedule),它定义了主体间时间发生的流程。特定的行为发生在特定的时间,行为的发展按照时间表的规定进行。

但是,需要注意的是,模型是对现实的模拟。现实生活中主体间的行为绝大部分没有一个固定的顺序,是并发的。例如,在本文所介绍的模型中,消费者对于四种消费品的消费顺序会对消费者的消费行为产生影响。消费者实际上不是按照固定的顺序依次对各类消费品进行消费。因此,为了模拟现实生活中这种无序的主体间的行为,应该把消费者对粮食、烟酒类、其他食品和其他商品的消费顺序打乱,这样才能把行为顺序对主体行为的影响消除掉。

(3) 机器学习。

CAS (Complex Adaptive System) 理论里的 Adaptive 的概念是很重要的,它说明主体是活的,具有适应性。因此,在构建 CAS 模型时如何体现这个适应性是个很重要的问题。

现在的人工智能、机器学习、遗传算法等理论和算法能够帮助我们体现主体的智能性和适应性。例如,本模型采用的分类器学习的算法就反映了主体根据自己行为造成不同后果而调整行为的能力。

(4) 对主体行为的编码。

为了给主体调整自身行为提供一个依据,在遗传算法、分类器学习中由于算法计算的需要,通常要将适应度和行为进行编码,此时,采取一些精巧的方法进行定义和编码往往有很好的效果。

例如,在本模型中,每位消费者的消费行为是他对四种商品调整消费倾向的动作的总和。对每种商品,每个消费者可能采取的行为有:增加、保持和降低该类商品的消费倾向。这样,每位消费者的消费行为就是对四种商品(对每种商品可能采取三个行为之一)调整消费倾向的组合。

由此,在定义主体行为时就采用一个四位二进制数来体现主体的行为。其

中每一位反映的是不同类的商品,而三进制数以 0, 1, 2 分别来表现增加、保持和降低对该类商品消费倾向的行为。

诸如此类的编码方法能够有效地表现主体的所有行为,同时也为遗传算法构建染色体、在分类器学习方法中对机器行为进行分类提供了清楚易用的行为编码。

7. 模型的运行结果

Swarm 平台的探测器机制能够提供灵活多样的表现方式,帮助建模者从运行的系统中取得各方面有用的属性进行分析。

由于 Swarm 具有灵活的输出机制,因此建模者可以十分方便地从模型中抽取各个角度的数据,然后再从平台提供的多样输出形式中选择适当的输出表现形式。在模型中我采用了曲线图和直方图两种图来表现四组输出结果。

(1) 用四个曲线图体现消费者的消费倾向变化。每个曲线图分别表现不同商品:烟酒类消费品、粮食、其他食品和其他日用易耗商品的消费倾向变动状况。每个曲线图中包括三条曲线,分别表示上海、重庆和河南三地居民对该类商品的平均消费倾向变动情况。

经过一段时间的运行后,得到的结果如图 5—46 所示。

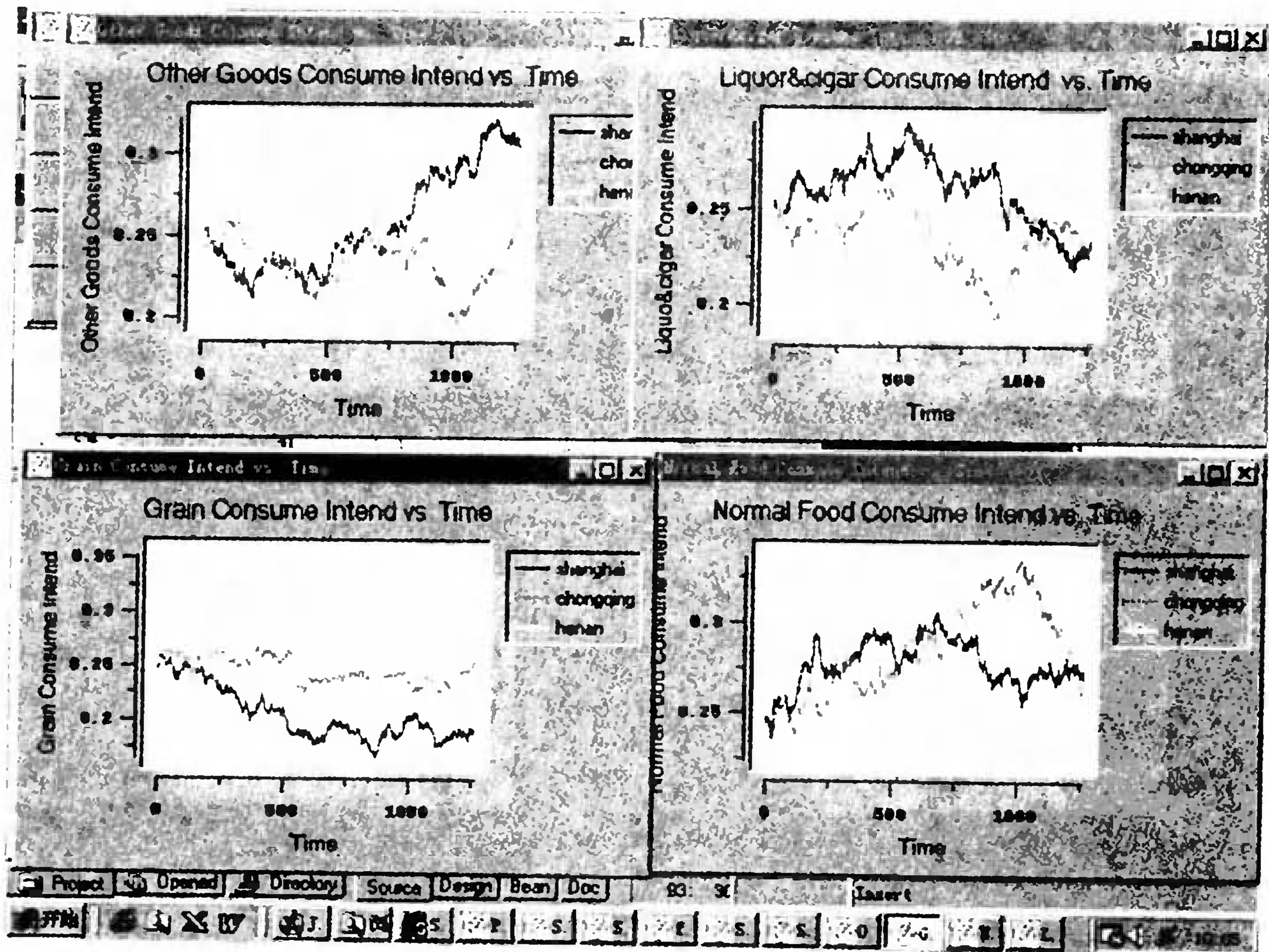


图 5—46 运行 1 000 步时的消费倾向

图 5—46 显示的是 100 个消费者运行 1 000 步时的输出结果，如图所示，四个曲线图中右上角是烟酒类食品的消费倾向变化情况，右下角是其他食品的消费倾向变化情况，左下角是粮食的消费倾向变化情况，左上角是其他易耗日用品的消费倾向变动情况。在每个图中，蓝色曲线代表上海，橙色代表重庆，黄色代表河南。

从图中可以看出，在前 100 步内，消费者还处于学习阶段，此时消费者还没有找到对自己有利的行为方式，不同地区消费者的消费倾向的区分不明显。随着学习时间的增长，消费者逐渐积累了经验，其中，平均收入比较高的上海地区对于粮食的消费倾向是三个地区中最低的，而对于烟酒类消费品和其他易耗品的消费倾向最高；平均收入比较低的河南省对于粮食的消费倾向是三个地区中最高的；平均收入居中的重庆地区对于其他类的食品的消费倾向比较高。这个结果与现实生活中的现象是吻合的。

图 5—47 显示的是运行 15 000 步时的结果。我们依然可以观察到前面描述的那种可以用现实规律解释的情况。虽然在有的区间内三种曲线的分化不是很明显，但总体趋势上还是高收入地区（蓝色曲线）对非食品类商品消费倾向最高，而低收入地区（黄色曲线）对粮食和普通食品消费倾向较高。

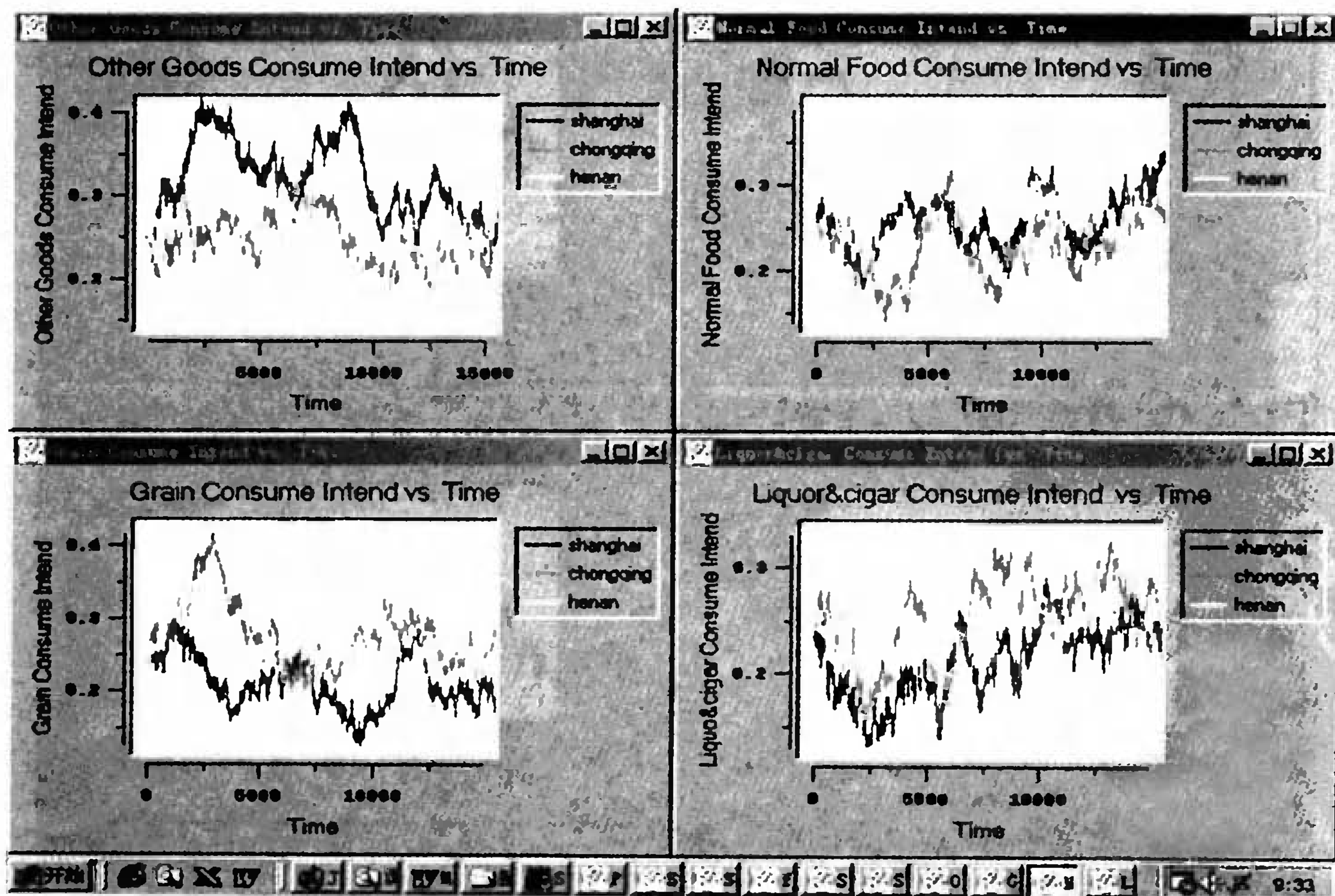


图 5—47 运行 15 000 步时的消费倾向

(2) 如图 5—48, 用一个曲线图来体现销量。四条曲线分别体现了模型中四种商品 (其中蓝色曲线代表烟酒类消费品, 黄色曲线代表粮食, 橙色曲线代表其他食品, 绿色曲线代表其他日用易耗商品) 的生产厂家的平均销量随时间的变化情况, 图中 X 表示时间, Y 表示平均销量。

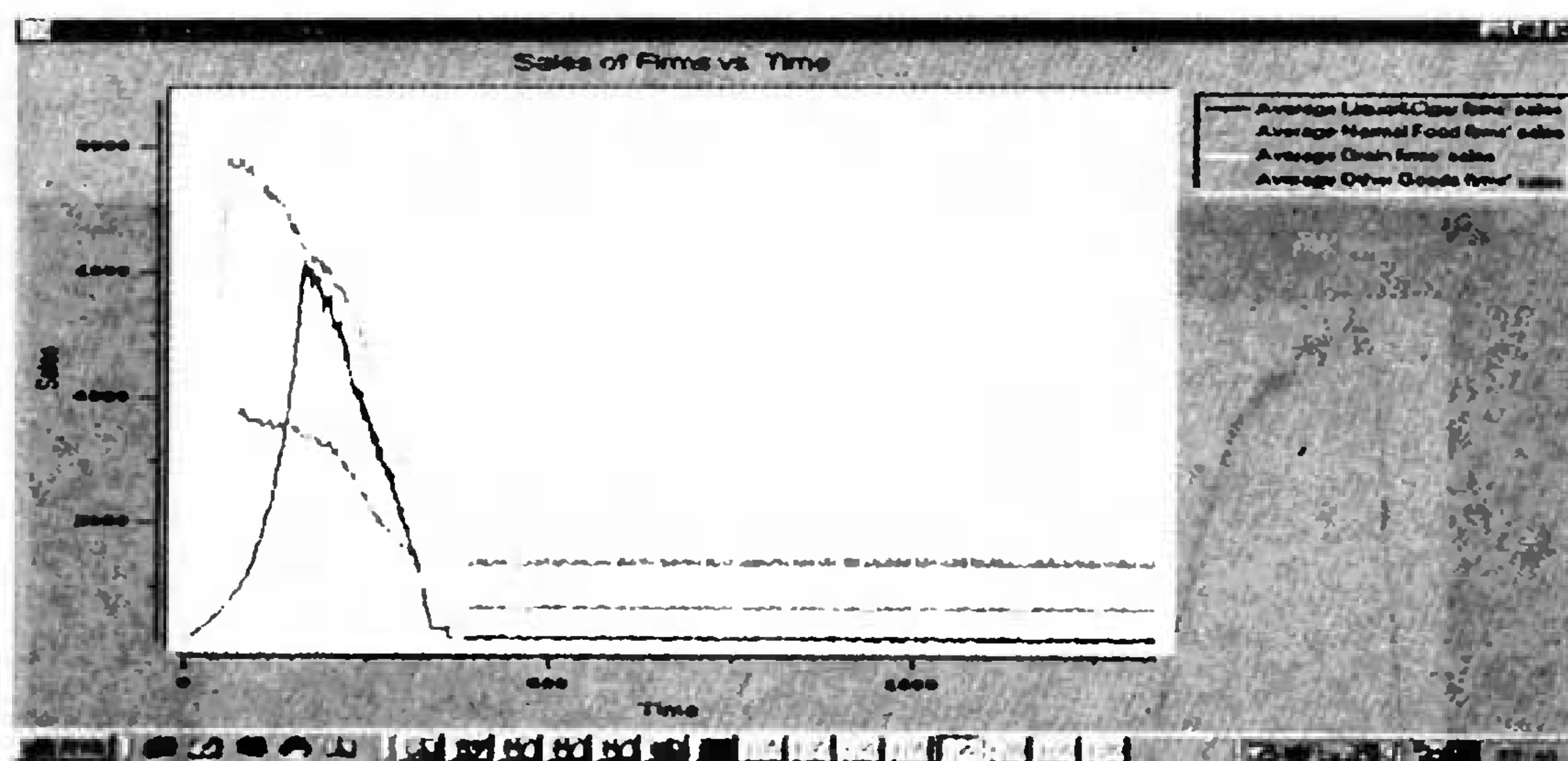


图 5—48 运行 1 000 步时的企业销售量

从图 5—48 可知, 四种商品的销售量在模型运行之初由于消费者和企业都处于学习状态, 有大幅度波动, 经过一段时间的适应, 都能保持较为平稳的状态, 即达到了市场均衡。

(3) 如图 5—49 所示, 用一个直方图表示企业盈利额, X 表示不同盈利额, Y 表示该盈利额范围内的企业数。

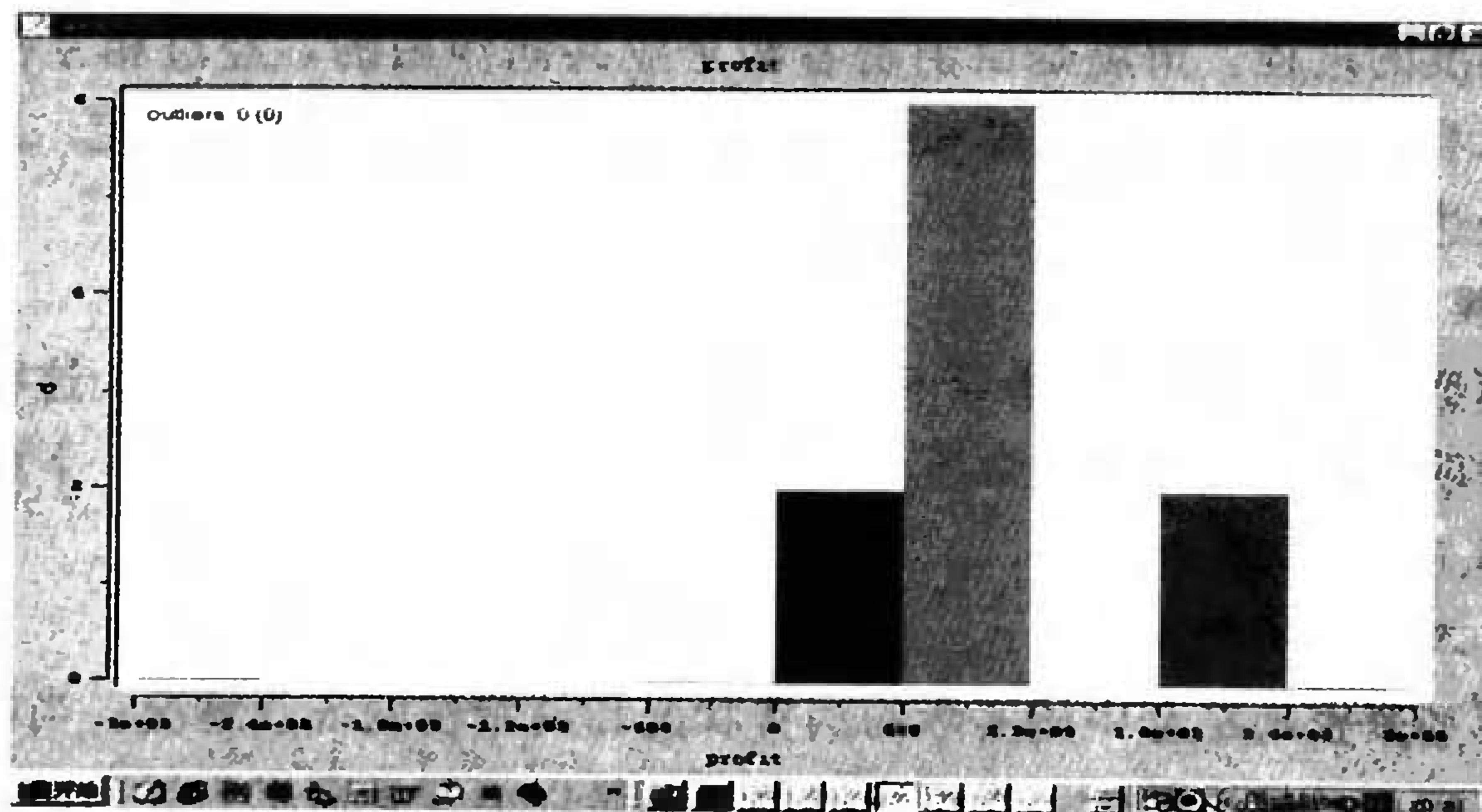


图 5—49 运行 1 000 步时的企业盈利状况

运行结果显示, 有两家企业的盈利处于 0~600, 八家企业的盈利处于

600~1 200, 两家企业的盈利处于 1 800~2 400, 可见, 大多数企业的盈利是在市场允许范围内, 这样既限制了暴利的个数, 又保证有一定的盈利。这体现了市场的正常运行。

(4) 如图 5—50 所示, 用一个曲线图表示三个地区消费者对于自己当前消费情况的满意度, 其中蓝色曲线代表上海, 橙色曲线代表重庆, 黄色曲线代表河南。

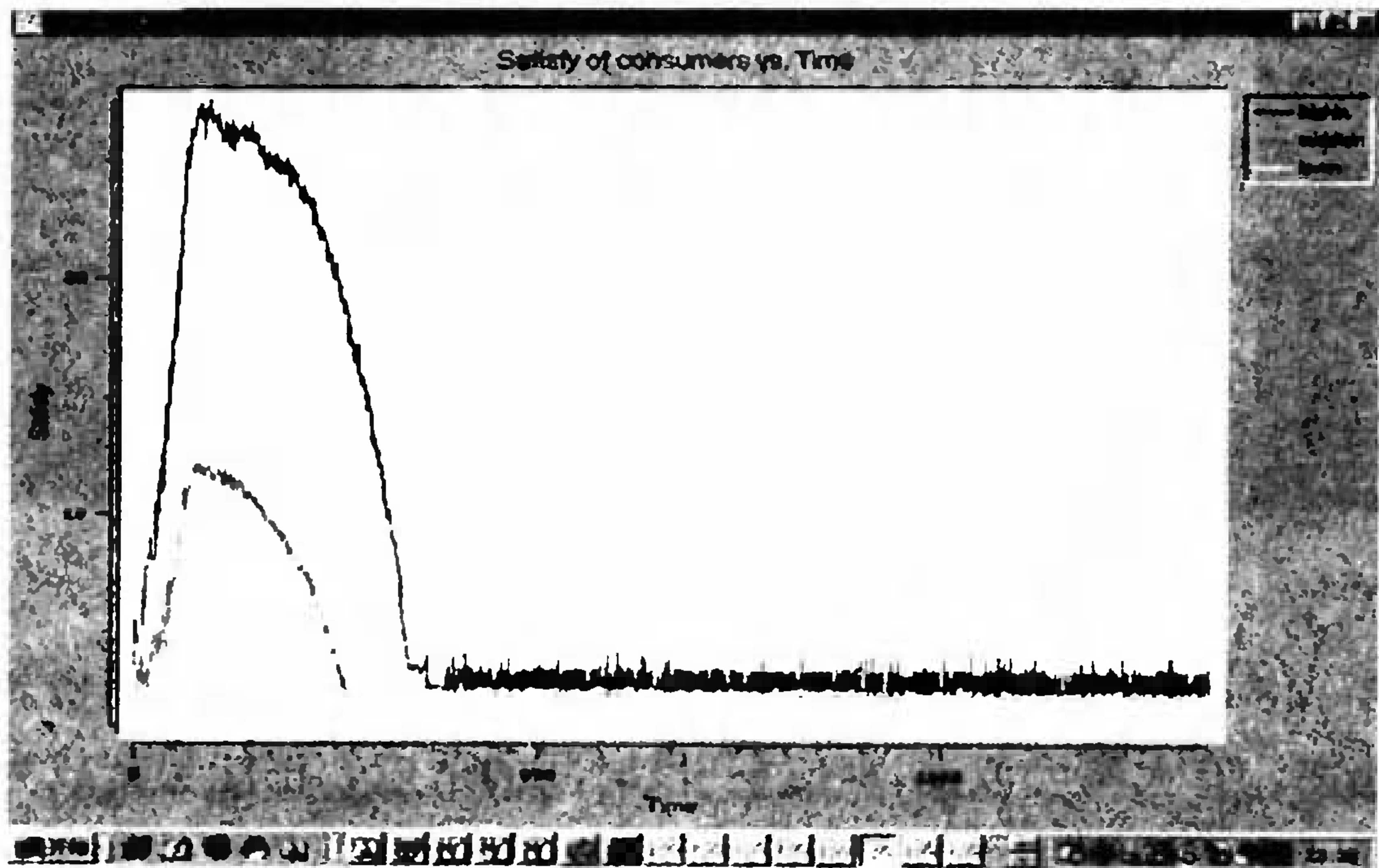


图 5—50 运行 1 000 步的消费者满意度

这个图形反映了消费者通过不断地学习, 逐渐将自己的消费行为调节到一个稳定程度的过程。市场是由消费者和企业共同作用的, 经过相互作用和学习, 可以看到消费者的满意度和企业的销售量以及利润都趋于稳定, 这体现了市场已经达到均衡状态。

8. 模型分析

本模型是在 CAS 理论指导下, 以 Swarm 平台为支持构建的。这种建模方法具有鲜明的特色 (如第三章所述), 同时也有一定的应用范围, 下面结合前面的建模工作加以分析。

(1) 本模型的特点。

本模型紧密地结合中国实际的消费状况和消费税的征收情况; 当前我国的经济正在向市场机制转变, 模型中的市场就是以消费者需求为导向的。政府只根据市场的均衡状态、价格的波动情况采取相应政策对市场进行调节。生产者是根据产品的消费状况制定价格和产量策略的, 其决策不受政府直接控制。

模型采用的是自下而上的建模思想。主体的适应性行为、主体间的相互作

用是市场宏观规律涌现的根本动力。在模型中没有建立宏观上的描述,只定义了组成宏观系统的主体及其行为规律。由于这些主体具有自适应的能力,我们观察到宏观上的现象——市场的动态均衡。为了实现消费者的学习能力,即适应性,模型采用 LCS 算法调整消费者的消费倾向。

(2) 与传统经济建模方法进行比较。

传统的经济建模方法一般是从经济宏观现象中抽取系统宏观上的属性,并建立这些属性间的关系。经济模型中变量间的关系是根据过去发生的关系来确定,其中暗含了经济现象是连续性的假设。但现实表明,事物的演变不是连续的曲线,而往往由一系列不连续和特殊事件所组成;模型可能对经济现象中的关系给出不变的假定,而实际经济生活的变化则远比理论复杂;经济生活中充满了不确定性,经济学的原理无法精确描述现实的经济生活,而传统的经济建模方法过于依赖数学的精确性,这往往会产生误导。在传统的经济模型中经济现象往往是线性的、精确的和必然的,而这与现实中的经济生活是不一致的。

近来被广泛应用的 CGE 模型(可计算一般均衡模型),对经济生活中的各类市场,商品与要素的价格及所有商品产出与要素供给同时进行确定。它可以对事件前后商品和要素的均衡价格及数量的变化进行比较静态的分析。但它无法预测像 1997 年亚洲金融危机这样的意外结果。

基于 CAS 理论建模采取的是自下而上的建模方法,这种与传统经济建模完全相反的方向使得它能深入现象的内部去解决问题。例如,经济生活中的一些突发性事件往往有其微观基础,我们可以在 CAS 模型中将这种微观因素考虑进来,以一定的机制(如概率事件、随机因素)使这个微观因素发生作用。CAS 主体间的相互作用是非线形的、复杂的,这很好地解决了传统经济模型中反映不确定性的问题。在 CAS 建模时,并没有对经济现象中的关系做什么规定,只是定义了微观主体的属性、行为,宏观经济现象中的关系是从微观主体行为中产生的,这模拟了经济变化的复杂性。

(3) 模型的应用。

人民大学经济科学实验室基于 CAS 理论构建经济模型的工作属于国家自然科学基金重大项目——支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究的一个组成部分。其目的是研究 CAS 理论在对宏观经济形势进行预测、预警的作用。

此外,这种新的建模理论还可以应用在政策分析和计划领域。如前所述,由于经济的复杂性、不确定性,这种自下而上的基于适应性主体的建模方式有

着与生俱来的优点。

同时,值得注意的是,这种方法可以与传统经济学中的成就相辅相成。在对于主体的定义中,可以借鉴很多微观经济学中既成的定义。但是在“自下而上”这个大原则的限制下,它与传统经济建模方法又是截然相反的,因此对于传统经济学的借鉴又是有限度的。

(4) 模型带来的思考和模型今后的改进建议。

在构建这个模型的过程中,我们遇到过各种各样的困难。这些困难包括对于 Swarm 平台的理解和掌握、构建完整合理的模型逻辑体系以及程序中的一些具体处理等。但令我们感触最深的是专业领域知识对于建模工作是至关重要的。

由于知识结构所限,我们在经济专业领域方面的知识不多,对经济知识的学习是伴随着建模工作一同进行的。这方面的缺陷为建立模型带来了很大的困难。例如,我最初曾经认为特定商品对特定消费者的效用与消费者对这种商品的消费倾向呈正比关系,并据此制定了消费者对自身消费行为的满意度(与消费带来的效用有关)。模型运行的结果无法得到合理的解释,直到请教了相关专业领域的同学才发现模型的基础——消费行为满意度的定义是错误的。

当然,对于计算机建模者来说,不可能精通所有需要建模的相关领域。要解决这个问题,方法有两种。

一种方法是计算机程序设计人员与相关领域专家相结合。由领域专家构造逻辑模型,把模型的逻辑概念、内部制约关系、输出要求等告诉程序设计人员。而程序设计人员的任务是用计算机技术来实现模型。在建模的过程中,需要双方人员的不断交流,使得每一方能够不断地修正观念,正确地理解对方头脑中的概念。

另一种方法是把计算机建模变成一个简单易学的工作,使得该领域的专家能够很快地学会应用计算机建模工具来构建自己心目中设想的模型,并根据自己的需要得到相应的输出。这正是 Swarm 开发组的理想。在建模过程中常常会需要用到一些复杂的计算机技术来实现特定的功能,如果没有受过专门的编程训练,要熟练应用计算机语言和技术对于其他领域的专家常常是非常困难的。Swarm 已经把一些建模者常用的而一般人又不太容易编写的建模步骤做成了软件包,这些软件包可以被建模者当做建筑砖块那样直接加在程序中而不必考虑其内部的实现机制。另外,由于目前应用 Swarm 的开发语言还是 JAVA 和 ObjectiveC 这样的初学者不太容易很快掌握的语言,Swarm 的下一个版本将在除了 Objective C 和 Java 之外,还支持 JavaScript 和 Scheme。这些描述性语言在实际应用中,将更加易学,限制也更宽松。

本模型目前还是一个规模较小、假设限制较多的模型，今后可以逐步扩大模型描述的规模，把模型中主体的种类、个数加以丰满扩充，并在主体的行为规则中可以增加一些概率因素，这样就为模型增加了描述突发性事件的能力。

在算法方面，本模型采用的是单纯的 LCS 算法而没有加入遗传算法。这与我们最初希望能够比较遗传算法与其他的机器学习算法的想法有关。从第七章第二节模型的运行结果的介绍中可以看到，在模型运行到 1 000 步甚至 10 000 步时，LCS 方法的确可以产生学习的效果——不同类的消费者从初始相同的消费倾向逐渐分化为与现实情况相符合的状态。但是当继续运行至 40 000 步时，运行结果中不同消费者的消费倾向的区分就越来越不明显了。这种情况的出现应该与算法的机制有关。虽然 LCS 具有学习的能力并能优化行为规律，但是如果不与遗传算法结合，它的学习还只是进行策略的调整，而不能改变内部的机制，上述运行结果的出现是因为 LCS 得到的分类器是固定的，当一些分类器被选中的概率足够大时，其系统的结果会过早收敛，虽然还存在着其他较优的分类器，系统却总是围绕先前的分类器振荡，难以发现新规则，而遗传算法的机制能够改变其组织结构，它允许通过选择、交叉和变异的方法生成新的规则。从实践来看，遗传算法的计算机制非常适合模拟复杂适应系统，因此，我们建议在今后对模型的改进中应该加入遗传算法，把现在单纯的 LCS 改写为 GALCS（在分类器的学习中加入遗传算法）。

目前这个模型是在单个 PC 机上实现的，要建立更完全、规模更大的模型就应该把这套模型移植到具有更强运行能力的计算机上。我们目前的工作是为 CAS 理论、Swarm 平台在经济建模领域的应用进行尝试和探索，模型中采用的经济规则都是比较粗略的，今后我们想请经济领域的专家对模型中的主体行为和相互作用提出专业建议，这样构建的模型将可以为实际的经济形势预测和政策分析等工作提供有力的参考。

九、交通模型

（一）问题背景及模型介绍

交通是城市经济活动的命脉，随着经济的发展和物质生活水平的提高，车辆不断增多，道路交通日益拥挤。通常，车辆在交叉路口排队等候的延误远远大于其在道路上的延误，因此对交叉路口信号灯实施合理的优化控制，有利于缓解日趋紧张的交通问题，进而提高道路的通行能力。

交通系统是一个具有随机性、动态性、模糊性和自适应性的开放的复杂系统，其中包括车辆、行人、道路以及信号灯等主体，因此很难对其建立传统的宏观数学模型。在处理这样一个多主体的复杂适应性系统时，基于主体的计算机模拟是一种很好的方法，它能够近似描述客观现实的情况，进而分析和解决各种问题。

我们将 CAS 理论应用于交通系统的研究中，在 Swarm 平台上建立基于多主体的动态交通模型，提出单交叉路口多相位的实时遗传算法优化方案，建立基于多主体的、交叉路口信号灯实时遗传算法优化方案模型，对信号灯各相位的配时进行自适应优化。我们使用自底向上的建模方法进行模拟：将交通系统中的主要元素作为具有适应性的主体，利用元胞自动机模拟动态交通流；同时通过遗传算法动态优化信号灯配时方案。主体在模拟系统中不断地“学习”和“交流”，交通系统在宏观方面涌现出一定的动态特征和规律。进而，我们比较了自适应的遗传算法优化方案以及传统的信号灯固定配时方案两种情况下交通系统宏观参数的变化情况。从实验结果可知，遗传算法优化方案能够根据路况信息灵敏的优化信号灯各相位配时，从而提高交叉路口的车辆通行能力，减少交通拥塞。

与传统建模方法不同的是，该系统并没有中心控制机制，而仅仅以微观主体的行为为基础变化发展，系统在此基础上涌现出宏观层面上的特征。模型将车辆、路段以及信号灯作为三类具有适应性的主体，在利用元胞自动机（CA）模拟车流的基础上，通过遗传算法在每个信号灯周期内优化各相位的配时。

我们进行了仿真实验，结果表明与传统的信号灯固定配时方法相比，该模型能够根据交叉路口实时车辆数目的变化情况更加合理地优化信号灯配时，从而减少车辆在交叉路口处排队等候的时间，提高交通系统整体的通行能力。

（二）模型的描述和定义

系统结构图如图 5—51 所示。系统中有两类适应性主体：车辆和信号灯，它们具有各自的行为规则。二维元胞自动机用于模拟交通流，同时系统自适应地调整信号灯的状态，分别通过激励学习和遗传算法对信号灯进行局部优化和全局优化。中央管理器负责协调整个系统，同时具有预警功能，在固定的时段内汇报车辆在公路上的分布情况以及每一条路段上停止汽车的数量，车辆可以根据该信息及时调整自身行为。在系统运行的过程中，用户可以根据需要调整运行参数，而且可以实时查询任何一个主体的当前状态。我们假设系统中的车辆具有相同的类型，在初始状态下车辆主体在路段上呈泊松分布。

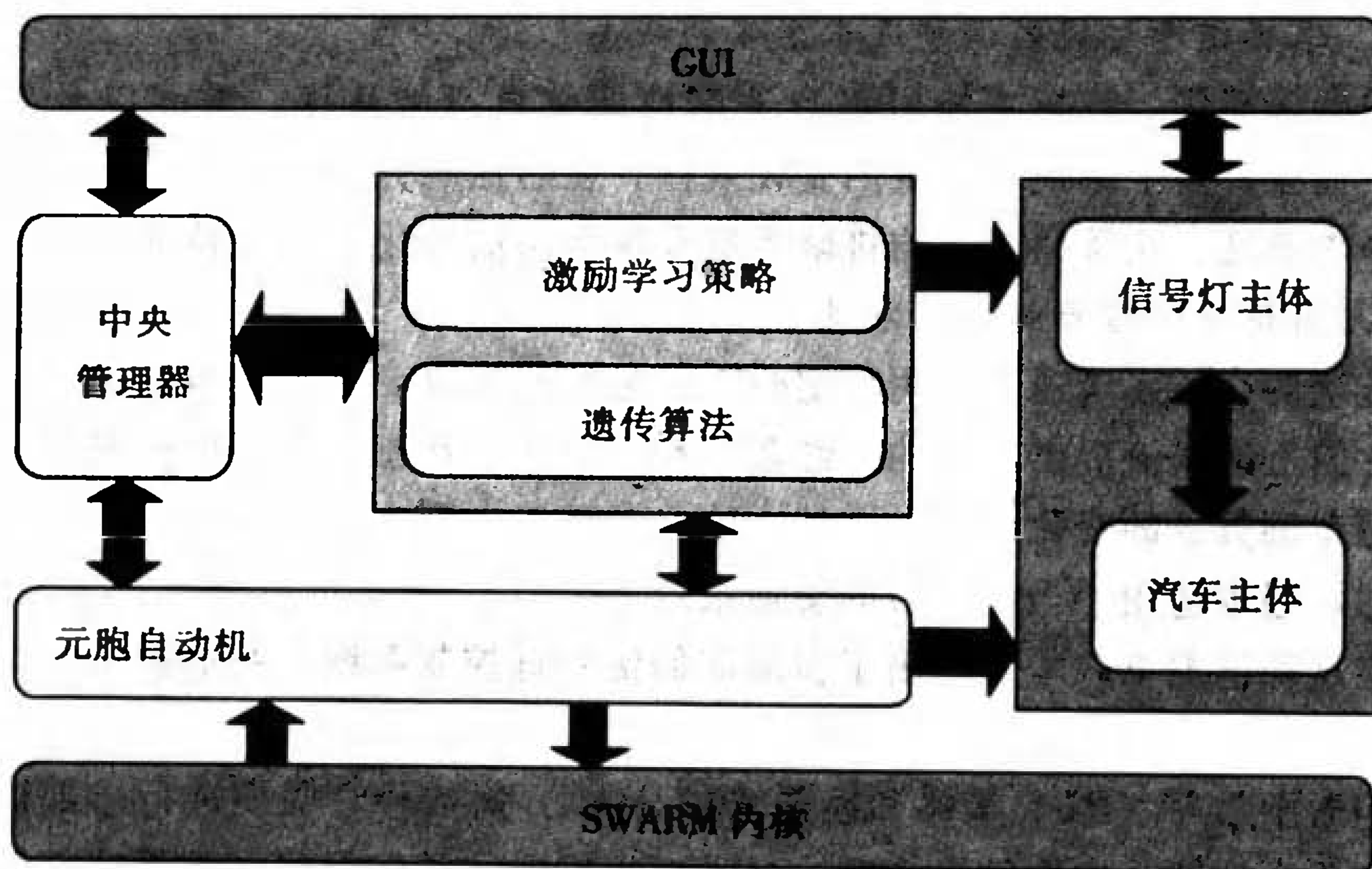


图 5—51 系统结构图

1. 利用元胞自动机模拟交通流

由于元胞自动机具有很好的适应性，而且其规则很容易被计算机所描述，因此它很适合对于离散现象的计算机模拟。我们在 Nagel 的多速度模型的基础上，利用二维元胞自动机模拟交通流。

在元胞自动机中，在某一时刻元胞的状态只取决于前一时点其自身状态以及与其相邻元胞的状态。模型将每条路段看做连结了很多元胞的纽带，元胞的状态要么为空，要么被一个汽车主体所占据。每一个元胞的长度是两个汽车主体之间允许的最小距离。在每一个离散的时间步进中，系统将按照如下规则对所有的汽车主体进行更新（其中 r 表示 $[0, 1]$ 范围内符合均匀概率分布的一个随机数）。

if(当前汽车主体前面存在另外一个汽车主体)

then

计算本车与离它最近的前面一辆车的距离 d ;

若 $d > \text{警戒距离}$ ，则速度 $v = \text{最大速度} \times r$;

若 $1 < d \leq \text{警戒距离}$ ，则 $v = \min(v, \text{前方车辆的速度}) \times r$;

若 $d \leq 1$ ，则 $v = 0$;

调整汽车坐标： $X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + v$ ，或 $Y_{\text{new}} = Y_{\text{old}} + v$;

如果车到达交叉路口，则根据预警机制发布的信息调整其方向。

else

则速度保持不变。

2. 根据信号灯规则调整汽车主体的状态

根据该规则,汽车主体可以自适应地调整自身的速度、方向以及当前位置,从而在宏观上形成车流量的变化规律。在后面的分析中,我们将详细说明车的平均速度、交叉路口平均排队等候车辆数目的变化等宏观特征。

3. 自适应的信号灯控制系统

传统的交通系统通常采用“定时”信号控制系统,这种信号控制方法为每一个方向上的车流提供固定的“红色”和“绿色”状态的时间序列安排,它并不考虑车辆数目的变化情况。这种方法非常易于实现,但是随着汽车数目的不断增加,很难适用于当前复杂的交通系统。

在这种情况下,本文提出了自适应的信号灯控制系统。我们把信号灯作为系统中另外一类具有适应性的主体,并利用演化算法调整其状态变化周期。模型采用激励学习(RL)策略和遗传算法(GA)对信号灯周期进行局部以及全局的优化和调整。实验结果表明,这种自组织方式的信号灯调整策略能够很好地适应现实的交通环境,可以处理复杂的交通情况以及突发事件。

4. RL 策略对信号灯的局部优化

每一个信号灯主体具有下列三个主要属性:信号灯状态、状态的概率以及在该信号灯处的车流量。对于处于同一交叉路口的两个信号灯而言,其状态具有相反性。

信号灯具有红色和绿色两种状态,分别由概率 p_R 和 p_G 决定,这两个概率之和为 1。假设目前红色状态的概率 $p_R > 0.5$,则信号灯的状态为红,否则为绿。在每一个信号灯主体的内部都有一个记忆器,用来记录当前时刻以及前一时刻该信号灯处的车流量。信号灯主体根据这个属性进行激励学习,以优化信号灯的周期。

每一个信号灯主体采用 Narendra 随机激励学习策略调整信号周期。首先计算各个信号灯的适应度 f :

$$f = \text{当前时刻的车流量} - \text{前一时刻的车流量}$$

$f > 0$ 说明该信号灯当前时刻的状态比前一时刻的状态更合适,我们应该激励当前时刻的信号灯状态;相反, $f \leq 0$ 意味着我们应该激励前一时刻的信号灯状态。

我们将举例说明如何通过 RL 策略对信号灯周期进行局部优化。假设当前某一信号灯的状态是绿色。首先计算这个信号灯的适应度 f ,若 $f > 0$,则应该激励该信号灯的当前状态,也就是提高信号灯绿色状态的概率 p_G :

$$p_G = p_G + \gamma \times (1 - p_G); \quad p_R = 1 - p_G$$

若 $f \leq 0$, 则激励前一时刻的信号灯状态, 也即降低信号灯是绿色的状态, 减小 p_G 的值:

$$p_G = (1 - \beta) \times p_G; \quad p_R = 1 - p_G$$

在 Narendra 随机激励学习策略中, γ 和 β 是系统的外部参数, 可以由用户规定, 以决定调整策略的力度。

每一个信号灯主体根据上述调整方法所得到的状态概率来调整其状态。通过 RL 策略进行局部优化, 可以使信号灯自适应地调整其信号周期以及红灯和绿灯在信号周期中所占的比例, 最大限度地减少排队等候车辆的数目, 从而减少车辆等候时间, 提高某个交叉路口的通行能力。

5. GA 对信号灯的全局优化

RL 策略可以减少局部交叉路口排队等候车辆的数目, 但是局部最优并不能保证全局最优。很多情况下, 优化某个交叉路口的交通流量反而会导致其他交叉路口的拥塞, 因此需要一个全局标准对所有交叉路口进行协调。本文借助遗传算法的思想, 实现信号灯的全局优化。

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。遗传算法中最优解的搜索过程模仿生物的进化过程, 通过染色体之间的交叉和变异来完成。在优化过程中, 使用三种遗传算子: 选择算子、交叉算子以及变异算子, 下文将对其做详细介绍。

模型使用了数值编码方式来定义染色体: 一条染色体由来自不同交叉路口信号灯的红色状态概率 p_R 构成。在初始时刻, 系统内部具有由染色体构成的随机种群, 每一条染色体都是一个信号灯的状态设计方案。方案的优劣程度由适应度函数判断。

适应度函数定义如下:

$$f = \frac{1}{\text{所有车辆的排队等候时间之和}}$$

适应度越高, 则说明信号灯状态的设计方案越好。

首先, 利用选择算子对种群中的个体进行优胜劣汰操作: 适应度较高的个体被遗传到下一代群体中的概率较大; 适应度较低的个体遗传到下一代群体中的概率较小。在此我们采用轮盘选择方法, 其基本思想是: 各个染色体个体被选中的概率与其适应度大小成正比, 即个体 i 被选中的概率为:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}$$

其次,“双点交叉”的交叉算子可以产生新的染色体个体,其基本思想是在染色体编码串中随机设置两个交叉点,然后进行部分基因交换。具体操作过程如下:

- (1) 在相互配对的两个染色体编码串中随机设置两个交叉点;
- (2) 交换两个染色体在所设定的两个交叉点之间的部分染色体。

最后,我们使用变异算子产生新的染色体,它将个体染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因座的其他等位基因来替换,从而形成一个新的个体。引入变异算子,可以改善遗传算法的局部搜索能力,维持群体的多样性,防止出现早熟现象。

本模型的变异算子采用“均匀变异”操作,其具体操作过程是:

- (1) 依次指定个体染色体编码串中的变异点;
- (2) 对每个变异点以变异概率 p 从对应基因的取值范围内取一随机数代替原有基因值。

假设现在某条染色体的变异点是 i 基因座处,其变异的取值范围是 $[U_{\min}, U_{\max}]$,在该点进行均匀变异操作后可以得到一个新的个体,其中变异点的新基因值是 $U_{\min} + r \cdot (U_{\max} - U_{\min})$,其中 r 是 $[0, 1]$ 范围内符合均匀概率分布的一个随机数。

通过选择、交叉和变异,新的染色体不断产生,而且其适应度不断提高,即信号灯的状态设计方案不断优化。在模拟中多次重复迭代上述过程,最终将得到全局最优的信号灯状态周期调整方案,这一全局最优方案可以提高整个交通系统的通行能力,最大限度降低车辆的排队等候时间,使得交通系统达到全局最优。

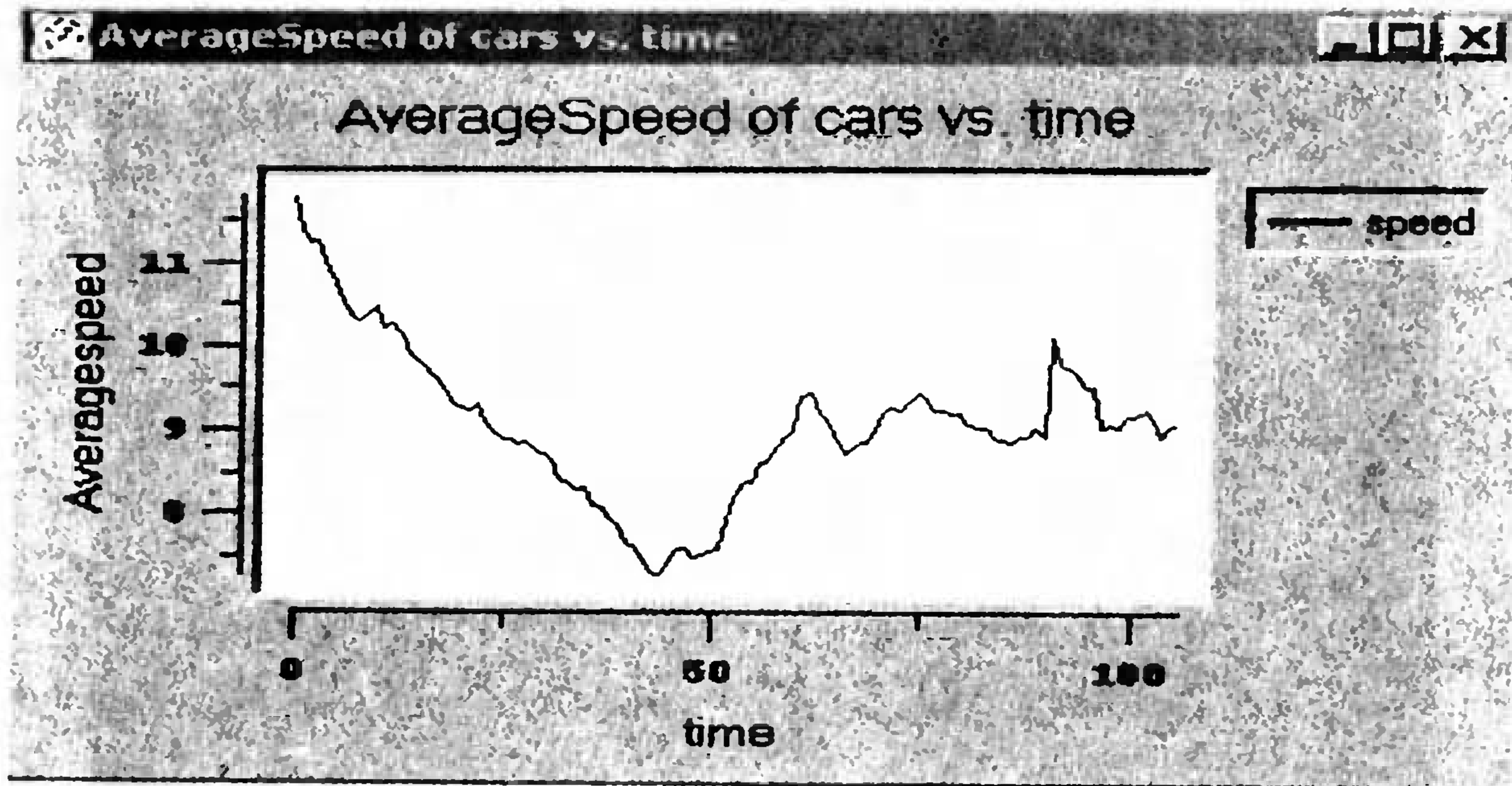
(三) 实验结果分析

在这一部分中,我们将讨论系统通过自适应主体的学习和交流所涌现出的宏观特征,包括各路段汽车分布的柱状图、汽车平均速度变化折线图以及交叉口排队等候车辆平均数目变化折线图等。进而,我们分析了预警机制对于交通系统的重要影响。

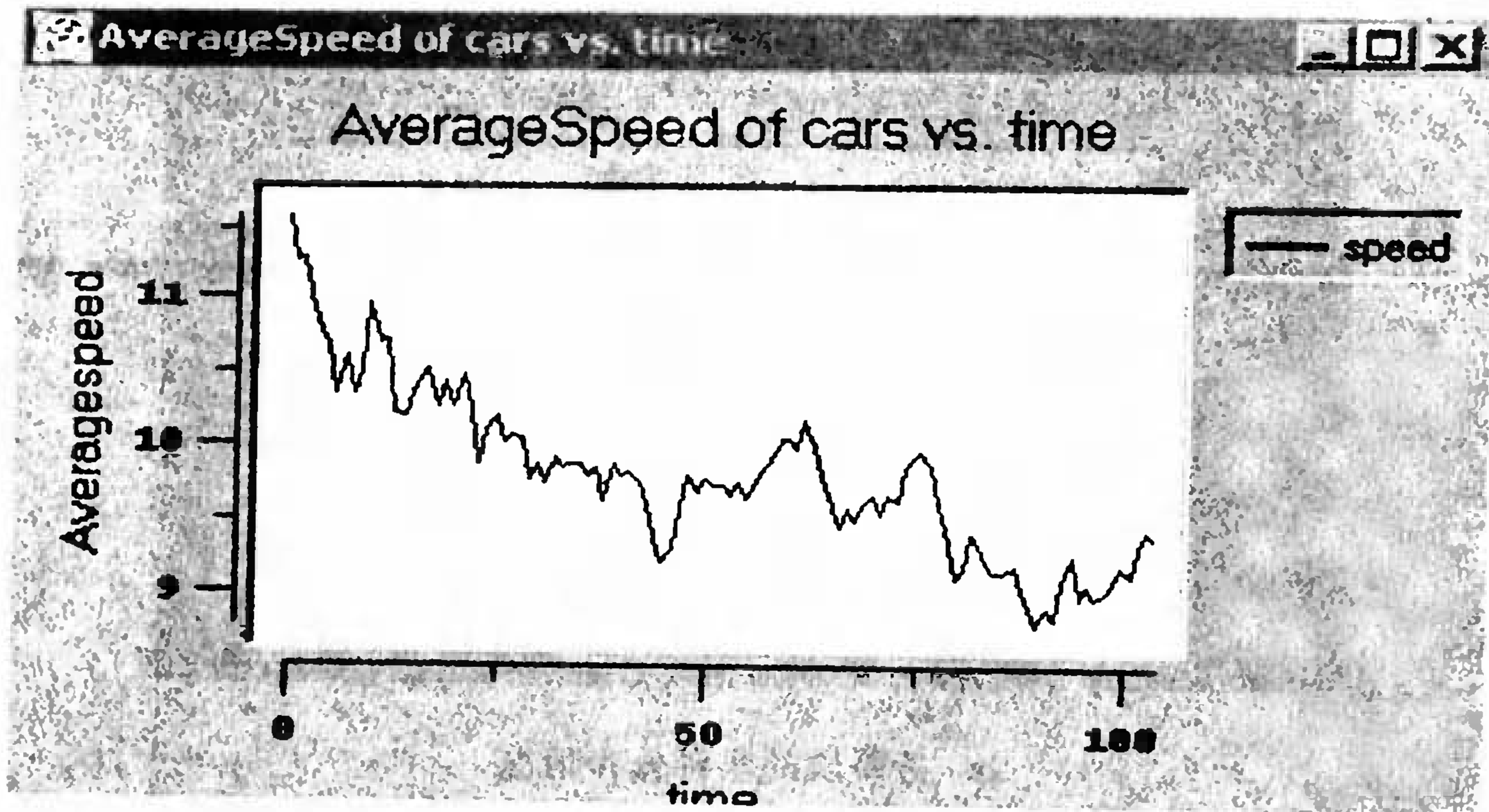
1. 车辆平均速度

首先,我们来分析预警机制对于车辆平均速度方面的影响。图 5—52 是车辆的平均速度随时间变化的曲线图。 x 轴代表时间, y 轴代表车辆的平均速

度。从图中可以看出，在没有预警机制的情况下，即主体完全以自组织方式进行活动的时候，平均速度波动很大。众所周知，稳定的车速对于交通安全而言是至关重要的，如果在相对较短的时间范围之内速度波动比较大，对于整个道路网上车辆的稳定性以及安全性都是不利的，这种情况很容易导致局部的交通堵塞，甚至会引发交通事故。而加入预警机制之后，车辆平均速度的变化幅度比较小，而且基本稳定在某一个范围之内，这是安全的交通系统所需要的前提条件。



a. 传统信号灯控制方法

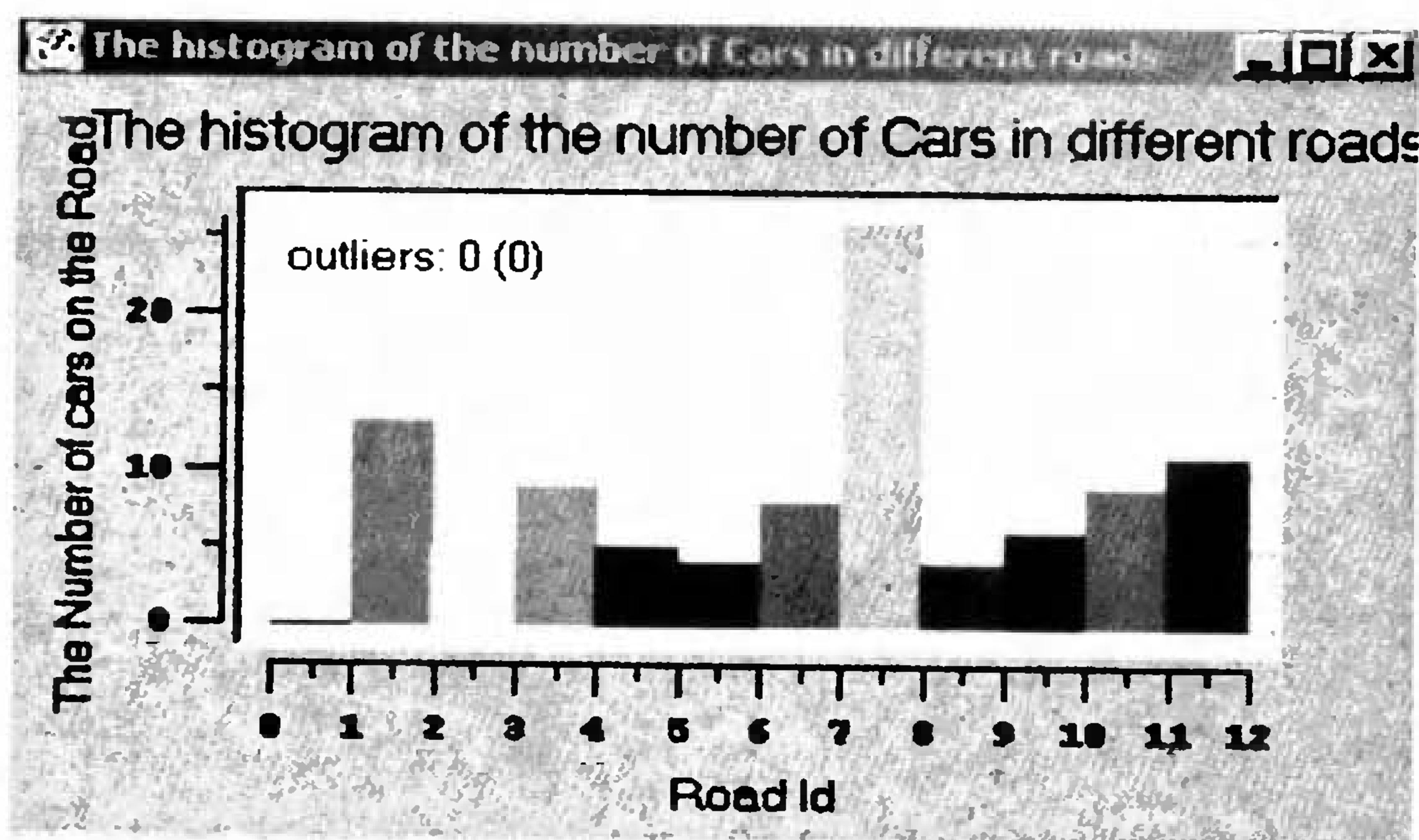


b. 自适应信号控制方法

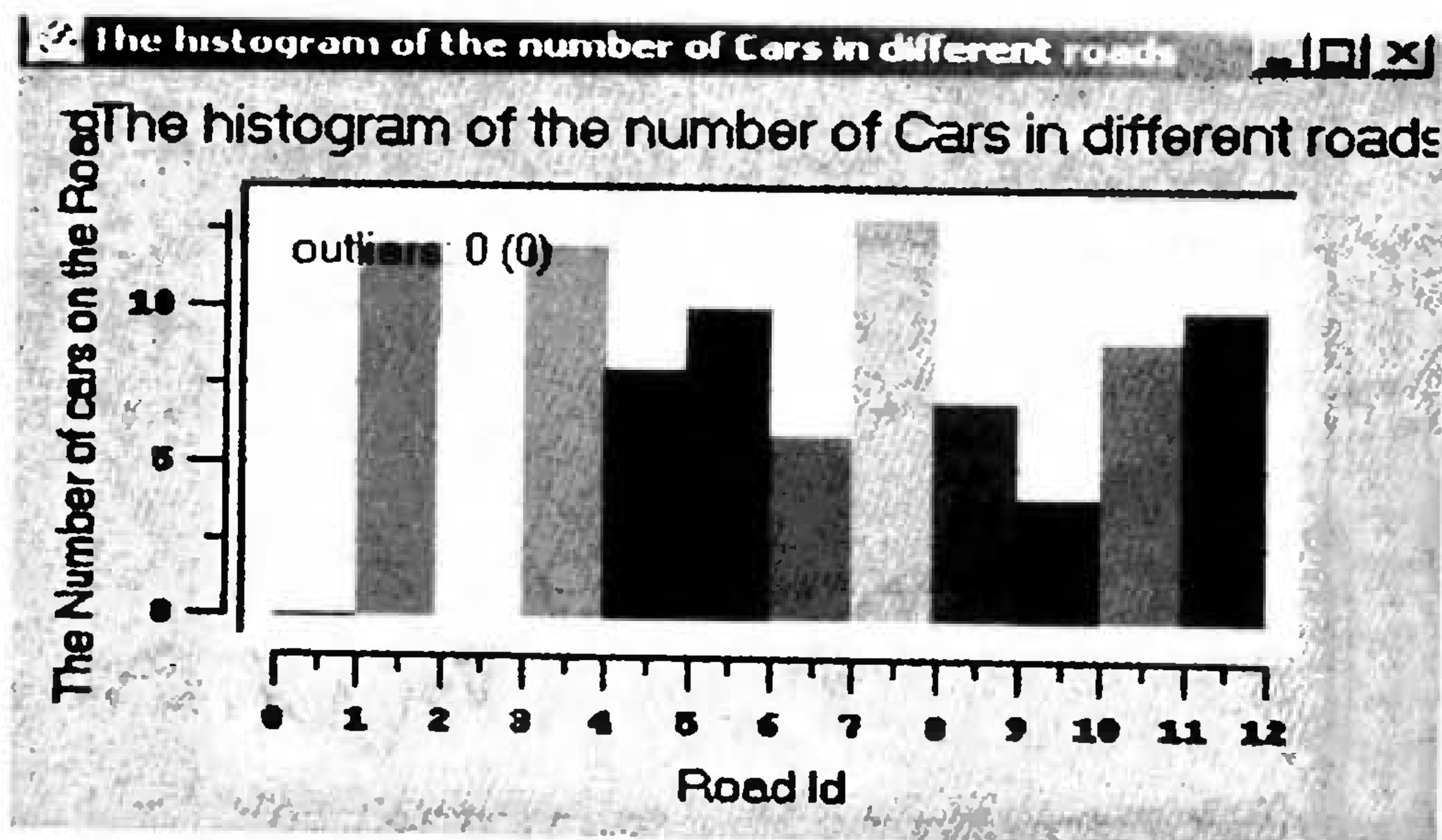
图 5—52 车辆的平均速度变化曲线

2. 车辆分布情况

我们来分析预警机制对于每一条路段上车流量的影响。图 5—53 描述的是各个路段上的车辆数目随时间变化的柱状图， x 轴是路段的 id， y 轴是车辆数目。从图中可以看出，如果仅仅局部优化信号灯，将会导致某一路段的车辆数目非常多，而其他路段上的车辆数目相对很少。这种情况对于顺畅的交通是非常不利的，很可能会使某些路段以及交叉路口的车辆堵塞，降低交通系统的效率。



a. 信号灯局部优化



b. 各路段的车辆分布情况

图 5—53 各路段的车辆分布情况

如果系统完全自组织演化，则各路段的车辆分布非常不平衡，这对于整体的交通系统是不利的；而如果在此基础上加入信号灯的全局优化，则可以解决

这个问题。每一个路段的车辆分布将会比较均匀，系统达到了动态平衡，使得整个交通路网系统得到优化。

十、人民币汇率调整对外向型企业的影响的模型

(一) 问题背景

人民币汇率问题近来成了国际社会的热门话题，国际社会无数专家学者纷纷对此提出了自己的见解。支持者有之，反对者也层出不穷，中立者也屡见不鲜。其中既有如蒙代尔、斯蒂格利茨等经济学泰斗，也有 IMF（国际货币基金组织）、高盛、摩根士丹利等世界顶尖经济研究机构，更有斯诺、格林斯潘等政经界巨头。可以说，汇率是否调整，如何调整成了摆在中国政府面前的一个紧迫问题。可是，在相关分析文章中，少有定量分析比较的文章，更缺乏利用当代新兴计算机建模方法对此问题进行探讨的尝试。

本文基于复杂适应性理论，利用 Swarm 计算机建模平台进行建模，在计算机模型的基础上，对人民币汇率调整的影响进行分析。通过比较汇率不变，汇率小幅上调，汇率大幅上调这三种情况下模型的运行结果，对比分析关于汇率的三种决策对外出口型企业的影响。

(二) 模型的构建

1. 模型简化假设

由于计算机模拟需建立在量化数据的基础上，而经济层面上许多事物尚无法进行量化表述，例如规模生产函数等。因此，本模型进行了相应的简化。

本模型共做了以下简化：

以服装业作为出口型企业的代表。因为模型中需要行业平均利润率、平均开工率等数据。而这些指标在不同行业间不尽相同。因此，不宜把它们放在一起考虑，而且服装业的出口外贸依存度高达 60%，因此我们选取其为代表。

垄断竞争假设。即每家企业间的产品具有一定的差异性，有一定的定价权。

假设模型中企业的产品完全用于出口。

正态分布假设。我们假设企业的初始利润率，初始出口额，初始开工率，初始价格这四个经济指标服从均值为行业均值的正态分布，且各个值之间没有关联。

不区分固定成本和边际成本，假设每个产品的成本和利润率相同。

2. 模型中主体的特点及相互关系

本模型中的主体是企业。在模型中企业是主动的，具有适应性的个体。其

主动性体现在：它可以根据整个行业的宏观经济状况及自身的经营状况，做出独立决策。而适应性则体现在：所有的决策都是在个体自身利益最大化的目标下，结合自身所能获取的信息，做出的理性行为。抽象地说，所有的决策都是各个主体随着环境的变化，选择能更好地适应环境，促进自身发展的行为的过程。

结合我国服装行业的现实情况，我们假设整个行业属于垄断竞争状态，即各个企业间的产品具有有限的差异性。因此，各个企业具有有限的定价权，即各个企业不像在完全竞争环境中那样，失去定价自主权。但又由于激烈的市场竞争，使得企业的定价不得不根据行业宏观经济状况的变化而不断变化，从而各企业间的价格差异并不大。

模型中各个主体—企业间的相互作用和影响是间接性的。即直观上看，各个企业彼此间无法对对方的生产经营活动产生影响。但是，每家企业都在与宏观环境不断发生相互作用，并且是在宏观环境和自身状况的基础上做出决策的。而宏观环境则是所有微观主体独立行为的结果。由此我们可以看出，各个企业通过与环境相互关系为纽带，间接地影响其他企业。例如，每家企业的销售状况，直观上看似乎只是自身产品定价和行业均价间比较关系的结果。可是行业均价正是行业中各个主体各自独立定价所共同导致的结果。各个企业的价格就是以行业平均价格为桥梁相互影响的。

3. 模型的结构

本模型主要由四个类组成，它们分别是：Company 类、InfluenceModel 类、Observer 类和 Start 类。各个类的用途如下：

(1) **Company 类**：我们用这个类来表示模型中的主体——企业。企业的经济指标用该类的属性来表示；企业的行为则通过类中特定的方法来实现。在模型模拟的经济系统中，每个企业就是一个 Company 类的实例。

主要属性：

`final double BIGGEST_STEP_OF_PRICE = 0.01`

表示每次企业价格调整的最大幅度。我们设定企业每次的价格调整最大只能上涨或下降 1%。

`final double ave_profit_margin = 0.14`

用于记录行业的初始平均利润率，由于这个属性值在运行过程中是无需改变的，因此设定其为恒定变量。

`public double price, initial_price`

用于记录商品的当前售价和初始售价。

static double ave _ price;

用于记录模型运行过程中商品的行业平均售价，由于此值对于每一家公司来说都是相同，因此设定其为类变量。

static double sell _ condition _ heigh _ than _ ave

商品售价高于行业平均价格的那部分企业的销售状况。

static double sell _ condition _ low _ than _ ave

商品售价低于行业平均价格的那部分企业的销售状况。

public double export

企业的出口额。

public double b _ export

企业的最大出口额。

public double working _ rate

企业的开工率。

public double profit _ margin

企业的利润率。

final double INTREREST _ RATE = 0.036

银行的最高存款利率，在模型中我们不考虑银行利率的变动，因此我们设定其为固定值。

public byte company _ color

企业主体在图形显示框上所显示的颜色。我们设定当企业正常经营时显示绿色，当企业扩产时显示蓝色，当企业破产时显示红色。

主要方法：

companyStep ()

每一模型循环周期中，企业主体的所有决策行为。

bankrupt ()

破产。在模型中我们设定当企业利润率低于当前银行存款的最高利率时，企业主便选择关闭工厂，即把工厂的最大产能设为 0。稍后，把该企业从模型中剔除出去。

enlarge ()

扩大产能。初始化时，每家企业都有自己的初始利润率。若该利润率高于行业平均利润率，就假设该企业偏好这个高于行业利润率的利润率。因此，当企业满负荷运作，且利润率均比行业利润率和初始利润率高出 20% 时，选择扩大产能。

PriceUp (boolean up)

涨价或降价。当企业的开工率低于 95% 时，企业会选择进一步下调价格。当开工率为 100% 时，企业会根据当前利润率决策下一步行为。若当前利润率低于前面所述的扩大产能的要求时，则涨价以提高利润率，否则扩大产能。若开工率介于 95% 与 100% 之间，则维持现状。每次价格的调整幅度为 0~1% 的一个随机数。

(2) **InfluenceModel 类**：协调各企业主体间，以及企业与经济环境间的相互作用。

主要属性：

public int numCompanies

模型中的企业数量，该值可以通过用户界面面板由用户设定修改。

public double t_supply

外向型企业的总供给。

public double t_sell

外向型企业的销售总额。

public double t_need

外国的总需求。

public double initial_need;

模型运行初期的初始外国总需求，该值可由用户通过用户界面进行设定。

public double ave_profit_margin = 0.14

模型运行初期的初始行业利润率。

public double apm

模型运行过程中的行业利润率。

public double FLEXIBILITY = 0.0068

我国出口总额的价格弹性系数。

public double move_of_exchange_rate = 0.05

汇率的变动幅度，该值可由用户通过用户界面进行设定。

主要方法：

updateBiggestExportAndSell ()

统计当前市场的总供给和销售状况，即加和存在于市场上的每家企业的最大产量和销量。

updateAve_Price ()

统计商品的加权平均价格，即各家企业的商品售价乘以其所占的市场份额。

updateTotalNeed ()

根据价格弹性系数，计算在当前价格下的总需求。

setSell ()

设定企业的销售状况。我们把企业分成两类，一类是售价低于市场均价的企业，另一类是售价高于市场均价的企业。我们假设前一类企业，大约可以获得 70% 的市场份额；而后一类企业，大约能获得 30% 的市场份额，除非前一类企业的生产能力无法满足市场需求。具体的市场份额分配方法将在后面详细介绍各个类时，再作具体说明。

(3) **Observer 类**：采集我们所关心的属性值，并把它们在图形窗口上显示。在模型中主要显示市场均价、企业平均利润率、总供给、总需求、市场上企业数量五条曲线。这些均通过调用 Swarm 的接口来实现。因此，在此不作特别介绍。

(4) **Start 类**：启动模型。

4. 模型运行机制

下面通过图表的形式来说明该模型各层次是如何运行的。各个类的相互关系如图 5—54 所示。

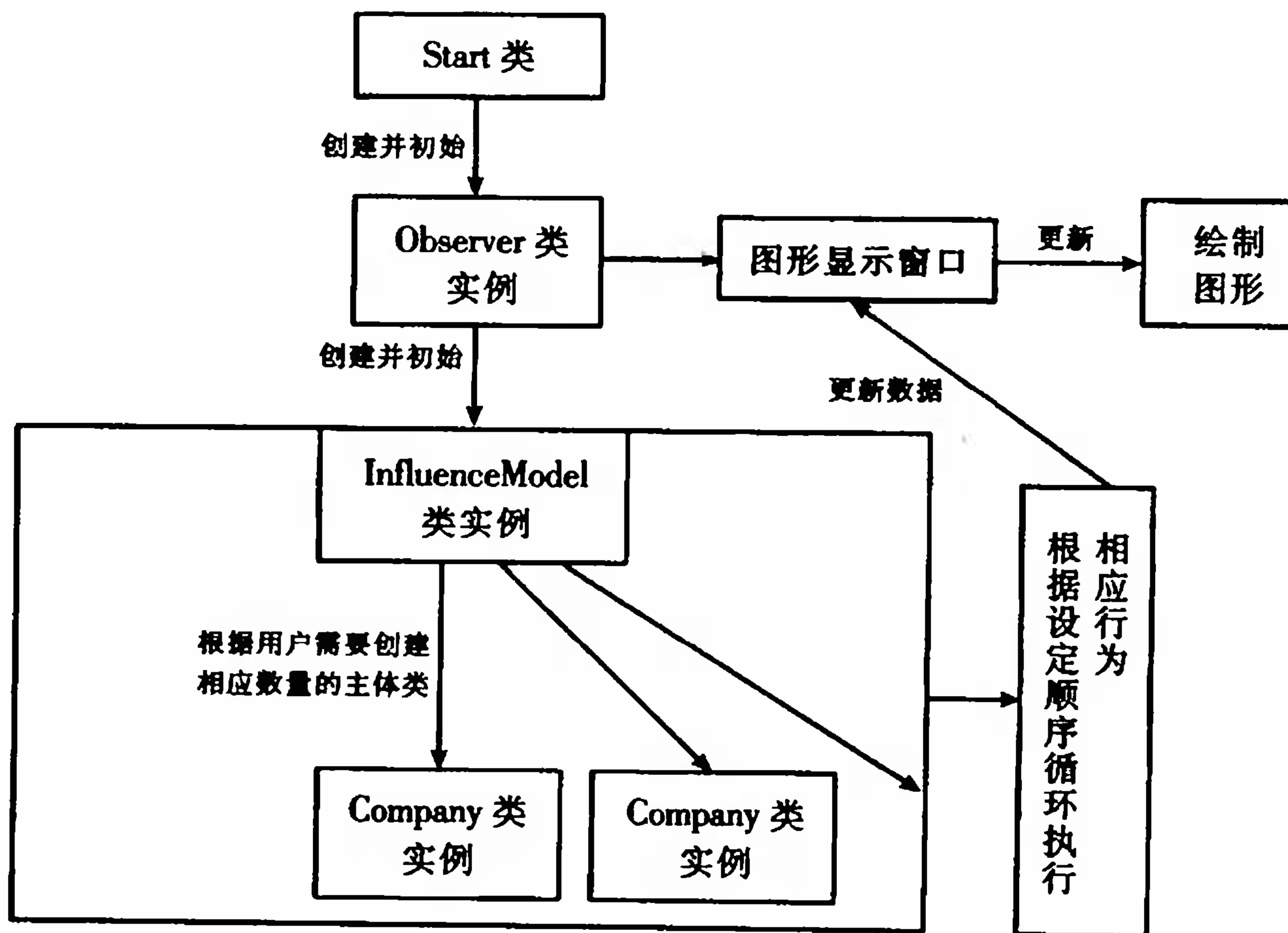


图 5—54 各个类的关系图

(1) 先运行 Start 类，它是启动整个程序的入口，由它创建并初始化 Observer 类实例。

(2) 运行 Observer 类的实例，创建所需图形显示框，例如用于显示市场均价变化曲线的显示框，用于显示行业平均利润率变化曲线的显示框，用于显示总供给和总需求变化曲线的显示框，用于显示市场上生存着的企业数量的显示框。创建并初始化 InfluenceModel 类的实例。

(3) 运行 InfluenceModel 类实例，根据用户需要创建并初始化所需数量的 Company 类实例。根据正态分布设定各个实例的初始出口额、初始开工率、初始利润率、初始售价。

(4) 循环执行 InfluenceModel 类实例和 Company 类实例设定的方法，收集更新后的图形输出所需的属性值，把它们传给 Observer 类实例，绘制图形。

InfluenceModel 类的运行结构如图 5—55 所示。

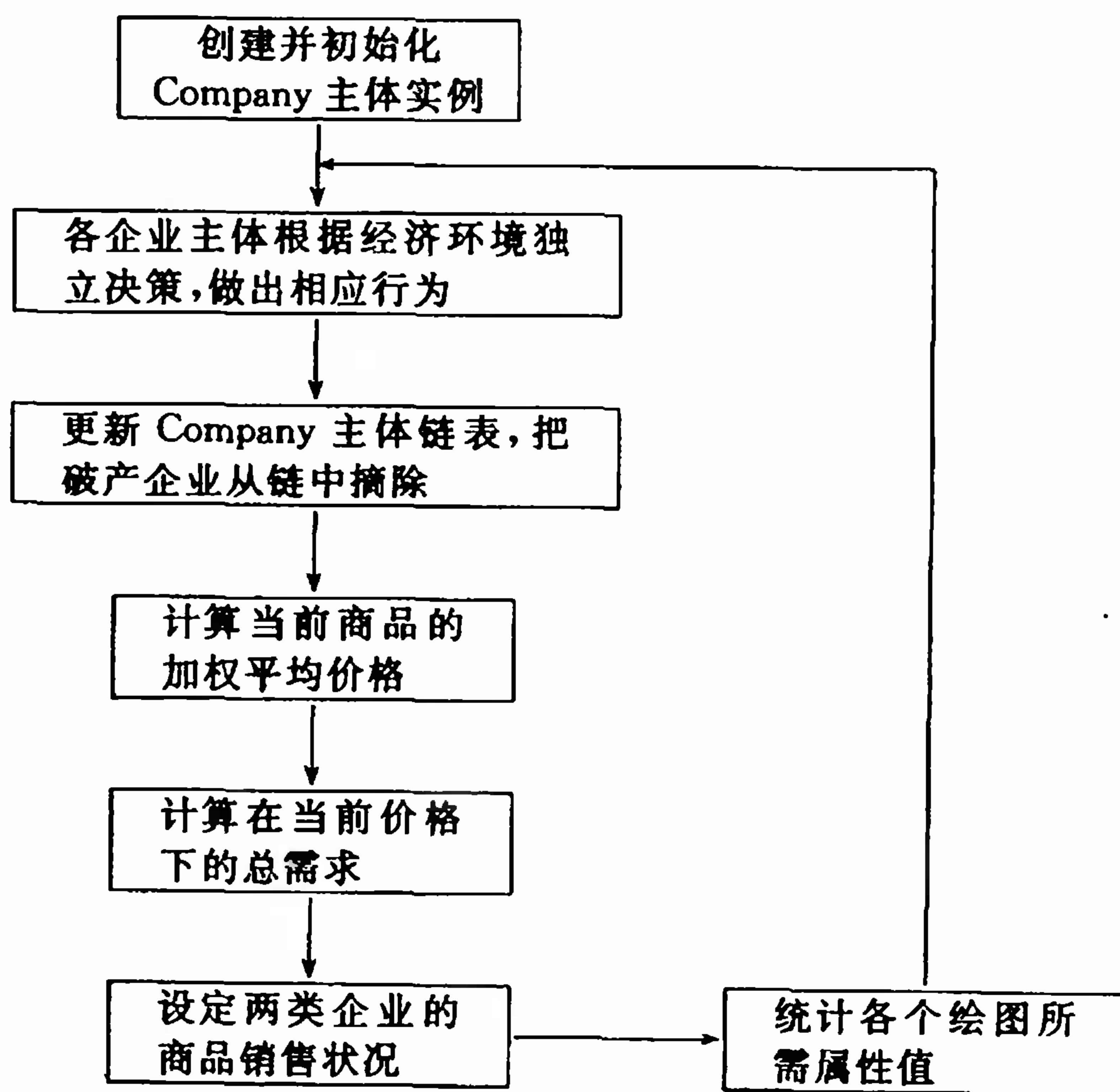


图 5—55 InfluenceModel 类运行结构图

初始化时：

根据用户需要创建并初始化一定数量的 Company 类实例。并根据正态分

布设定各个 Company 类实例的初始出口额、初始开工率、初始利润率、初始售价，之后把创建的实例添加到一条链表中，以便管理，但在运行过程中，若某企业破产了，我们则把它从链表中摘除。

运行时：

(1) 微观层面的各个企业根据经济环境做出独立的行为决策，具体过程在后面介绍 Company 类的运行结构时详细介绍。

(2) 检查链表中的每个公司，若公司已破产，则把它从链表中摘除。

(3) 计算商品的加权平均价格。权重为该公司的市场份额。

(4) 根据价格弹性，计算新价格下的总需求 (t_need)。

(5) 设定两类公司的销售状况。我们把所有公司分为两类，第一类是商品售价低于市场均价的公司，第二类是售价高于市场均价的公司。使两类公司的市场份额大致为 7:3。方法如下：

A. 求出第一类公司的最大生产能力之和 (le)。

B. 若 le 大于 $t_need \times 0.7$ ，则表示生产能力能满足相应市场需求，市场销售状况为 $(t_need * 0.7)/le$ ，第二类企业的市场份额 $hs = t_need \times 0.3$ 。

C. 若 le 小于 $t_need \times 0.7$ ，则表示生产能力不能完全满足相应市场需求，这类企业的销售状况为 100%。此外，未能满足的那部分需求，应转给第二类企业，因此，第二类企业的市场份额 $hs = 1 - (t_need \times 0.7)$ 。

D. 计算第二类企业的最大生产能力之和 (he)。

E. 若 he 大于第二类企业的市场份额 hs ，则第二类企业的销售状况为 hs/he ，否则为 100%。

F. 统计此时的平均售价、平均利润率等我们所关心的属性的值，并据此更新图表。

G. 进入下一循环。

Company 类的运行结构如图 5—56 所示。

(1) 若企业的利润率低于银行最高利率，则我们认为企业会选择破产。

(2) 若企业利润率高于银行最高利息，则再判断开工率是否高于 95%（假设此为企业满意开工率）。

(3) 若开工率低于 95%，则企业会降低售价，以期提高开工率。价格的升降幅度是一个介于 0 至 1% 之间的一个随机数。价格调整后，重新计算新价格下的利润率。

(4) 若开工率高于 95%，则进一步判断开工率是否等于 100%。

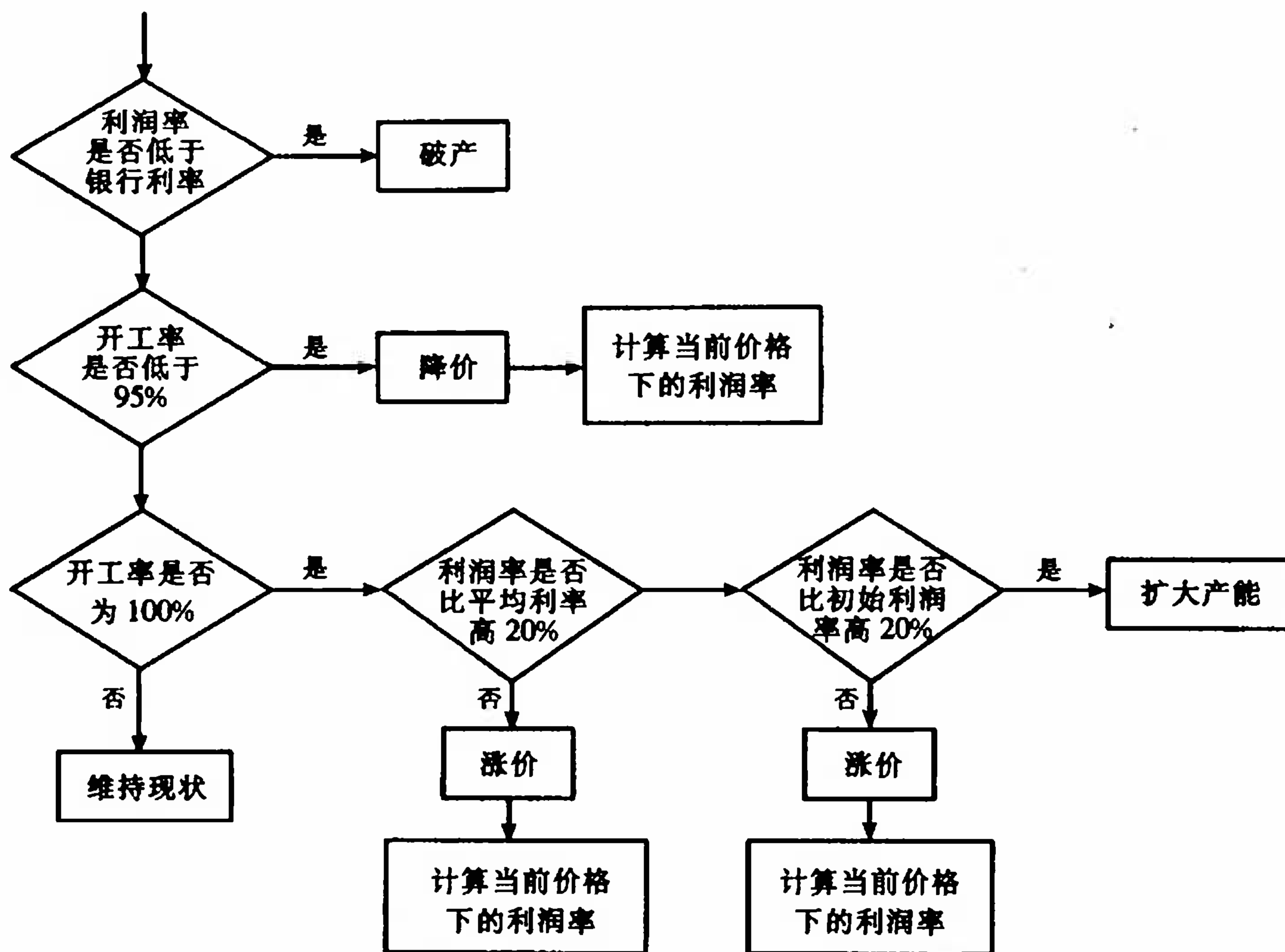


图 5—56 Company 类的运行结构图

(5) 若开工率介于 95% 与 100% 之间，则维持现状。因为此时的开工率处于较理想状况，没有动机去改变价格和扩大产量。

(6) 若开工率等于 100%，则看利润率是否比行业平均利润率高出 20%。

(7) 若不满足上面条件，则升高价格，以提高利润率。

(8) 若满足条件，则进一步判断当前利润率是否比初始利润率高出 20%。因为我们假设，若初始利润率高于行业利润率，则表示该企业偏好这一高于行业利润率的利润率。因此，只有当前利润率比此初始利润率高 20% 时，才会选择扩大产能。否则，升高售价，进一步提高利润率。

(三) 模型运行结果及分析

下面，我们将通过设定不同的汇率调整幅度，来考察汇率不变、汇率小幅调整（上调 7%）、汇率大幅调整（上调 40%）三种情况下，商品平均价格、市场上企业数量、市场供需关系、行业平均利润率这四个经济指标的变化。并通过比较不同情况下经济指标的值，分析汇率变动的影响。

图 5—57 所示的三幅图是三种情况下，模型运行前的参数设置面板。

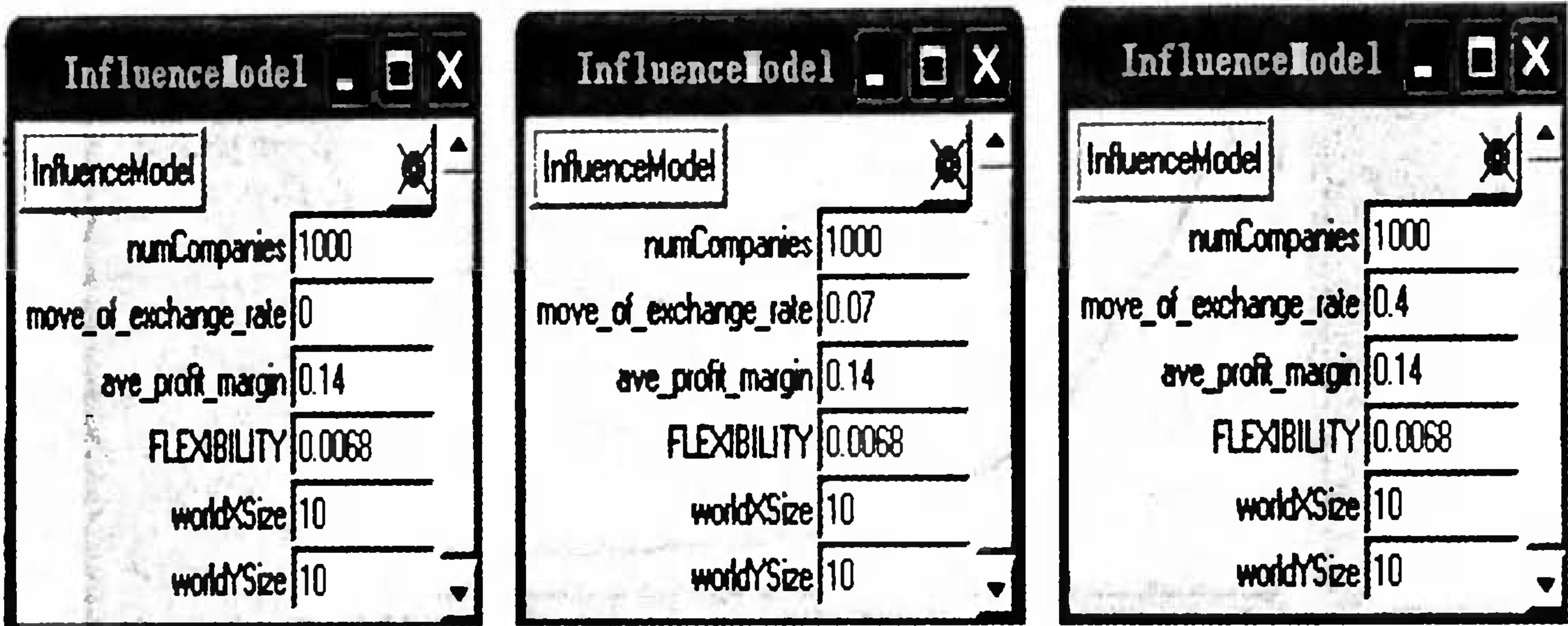


图 5—57 参数设置面板

从图中可知，三者惟一的区别仅仅是 move _ of _ exchange _ rate 属性值不同，即汇率变化幅度不同。下面让我们来看一下三种汇率政策对外向型企业产生哪些影响。

1. 市场加权平均价格的变化曲线（如图 5—58，图 5—59 和图 5—60 所示。）

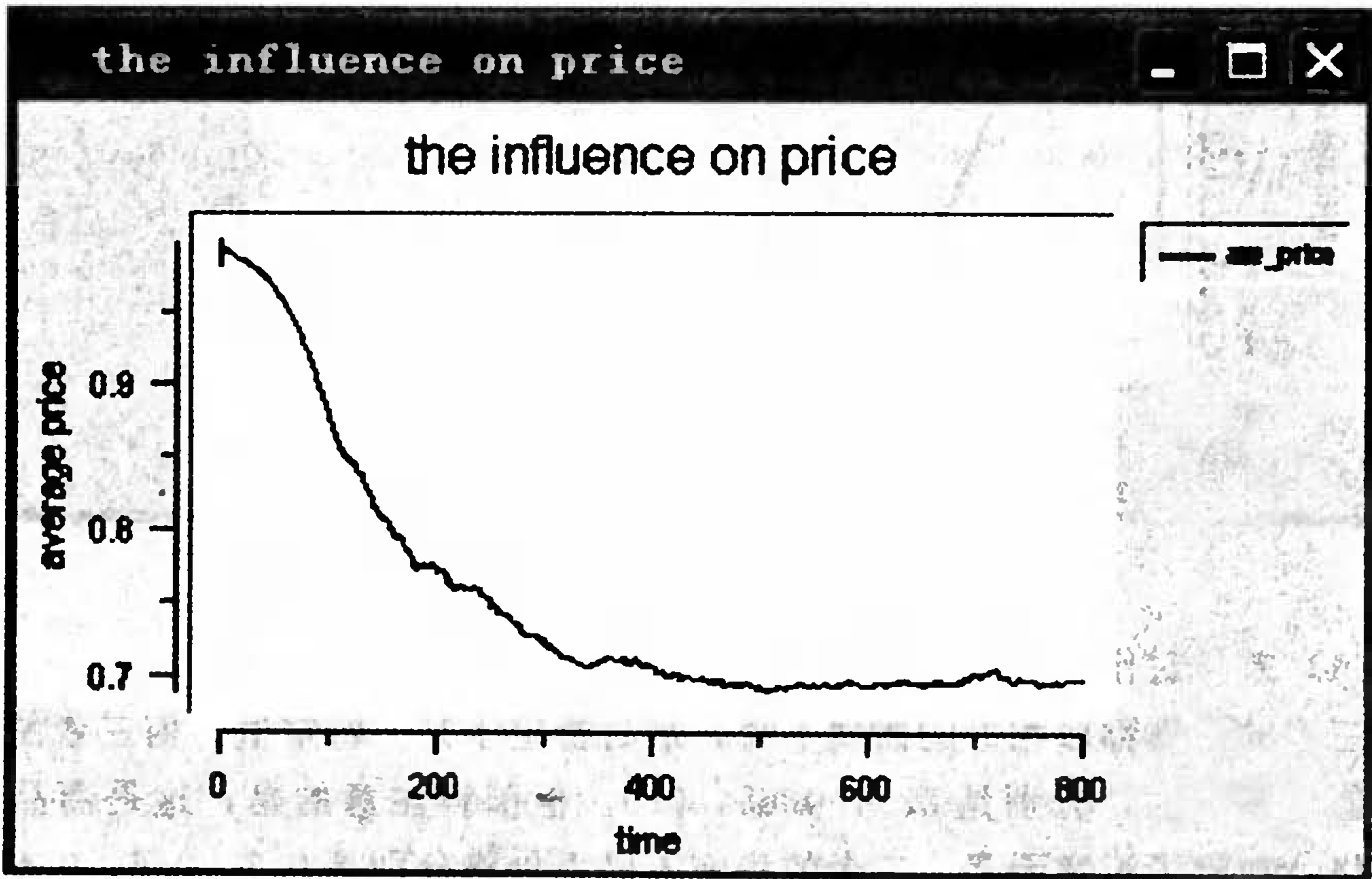


图 5—58 价格曲线变化——汇率不变

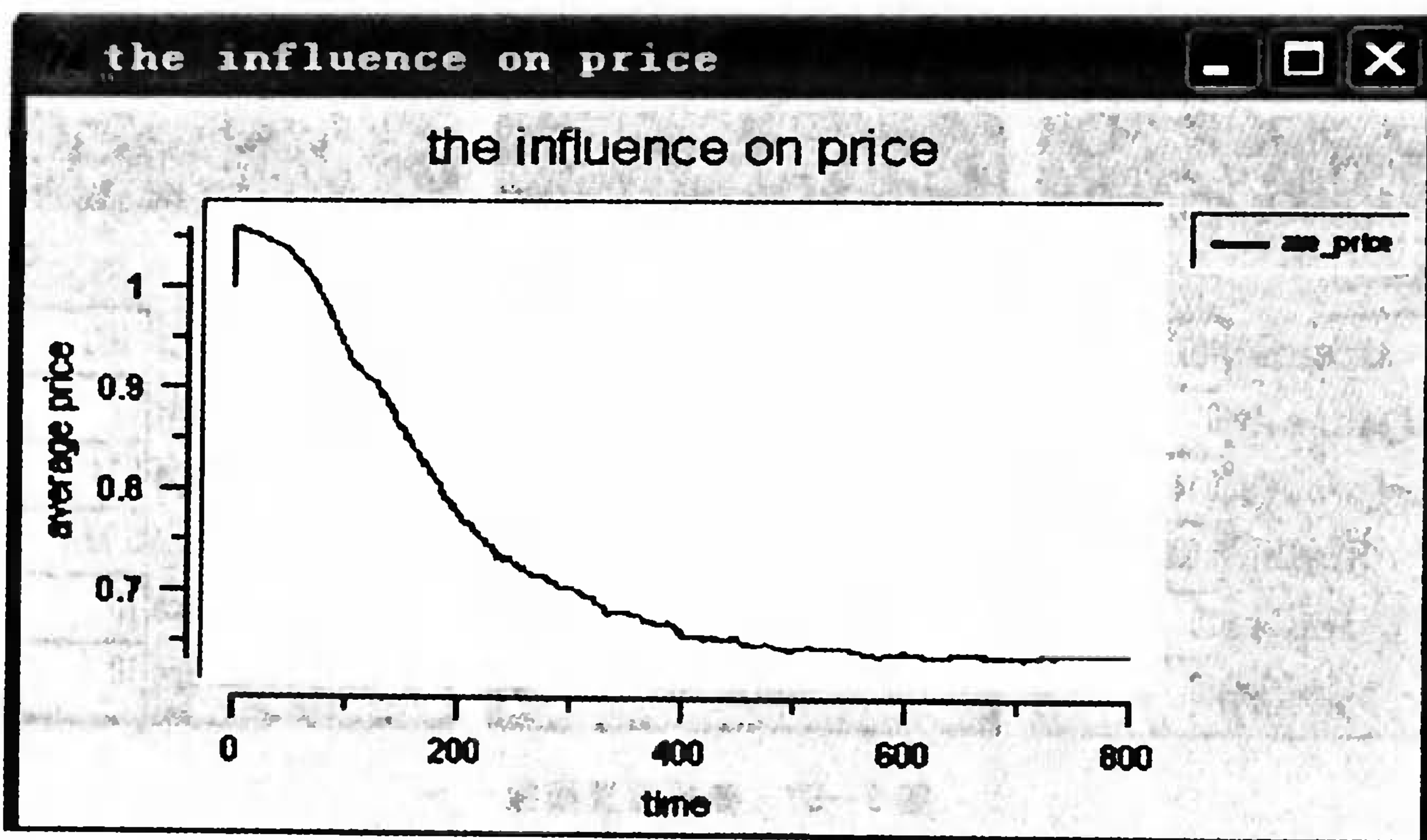


图 5—59 价格曲线变化——汇率小幅变化

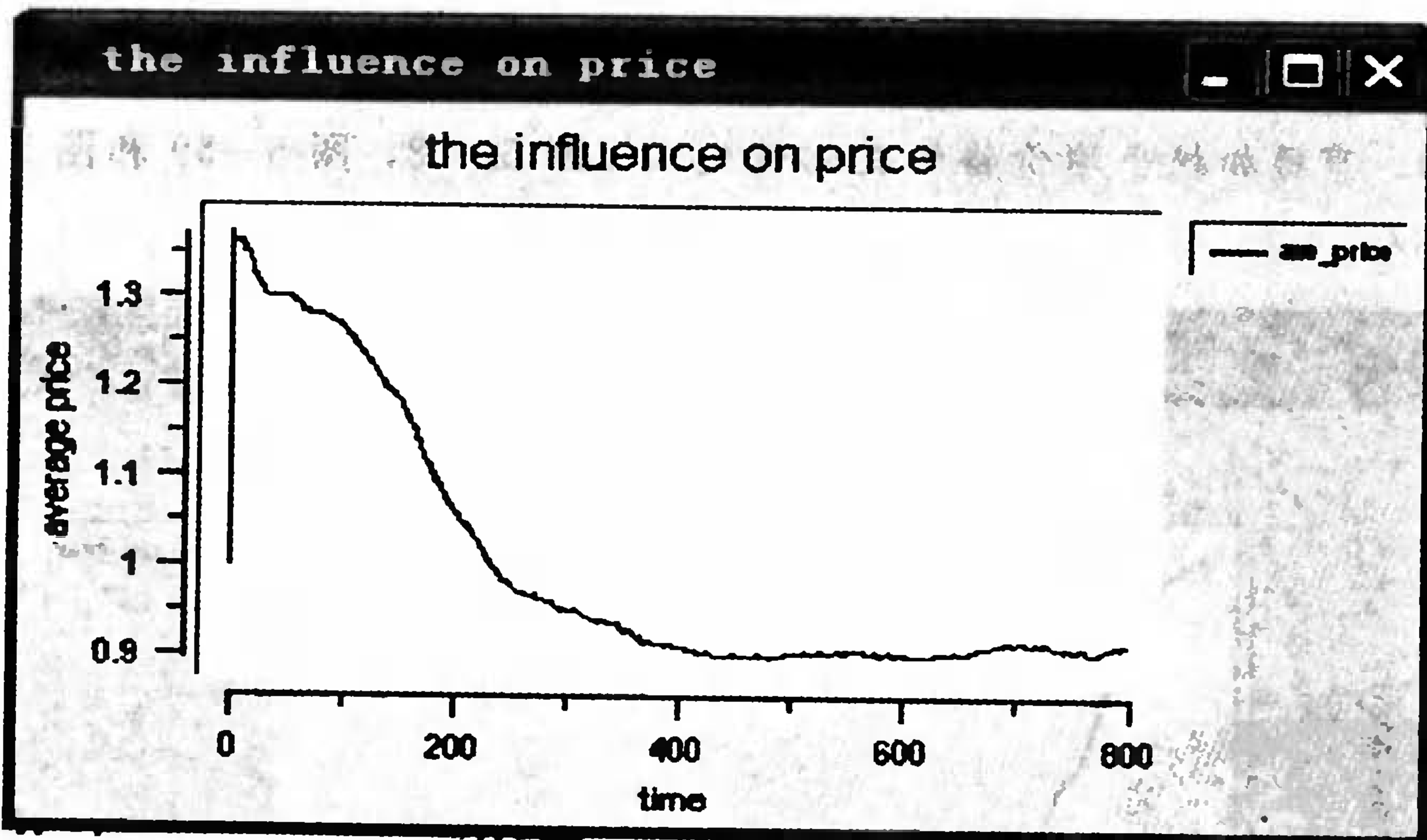


图 5—60 价格曲线变化——汇率大幅变化

(1) 差异对比。

三者的价格都以相近的曲线下滑，最后稳定于某一特定值，但三者的最后稳定值大不相同，分别是 0.7，0.65，0.9。但值得注意的是，这是商品的外汇价格，扣除了汇率因素。三者的稳定人民币价格分别是 0.7，0.6，0.64

(2) 原因分析。

由于汇率上调，导致相同人民币价格下商品的外国需求减少，即相同利润

率下销售状况恶化。因此竞争更加激烈，所以最后的均衡价格更低。虽然汇率上调 40% 时，外国需求更低。但是这导致前期企业破产数的增多，并极大地抑制了中期的产能扩张，因此后期的市场竞争较为缓和，所以汇率大幅变化时，前中期价格下降得更快，这样便更早地到达均衡价格。

2. 市场上企业数目曲线（如图 5—61，图 5—62 和图 5—63 所示。）

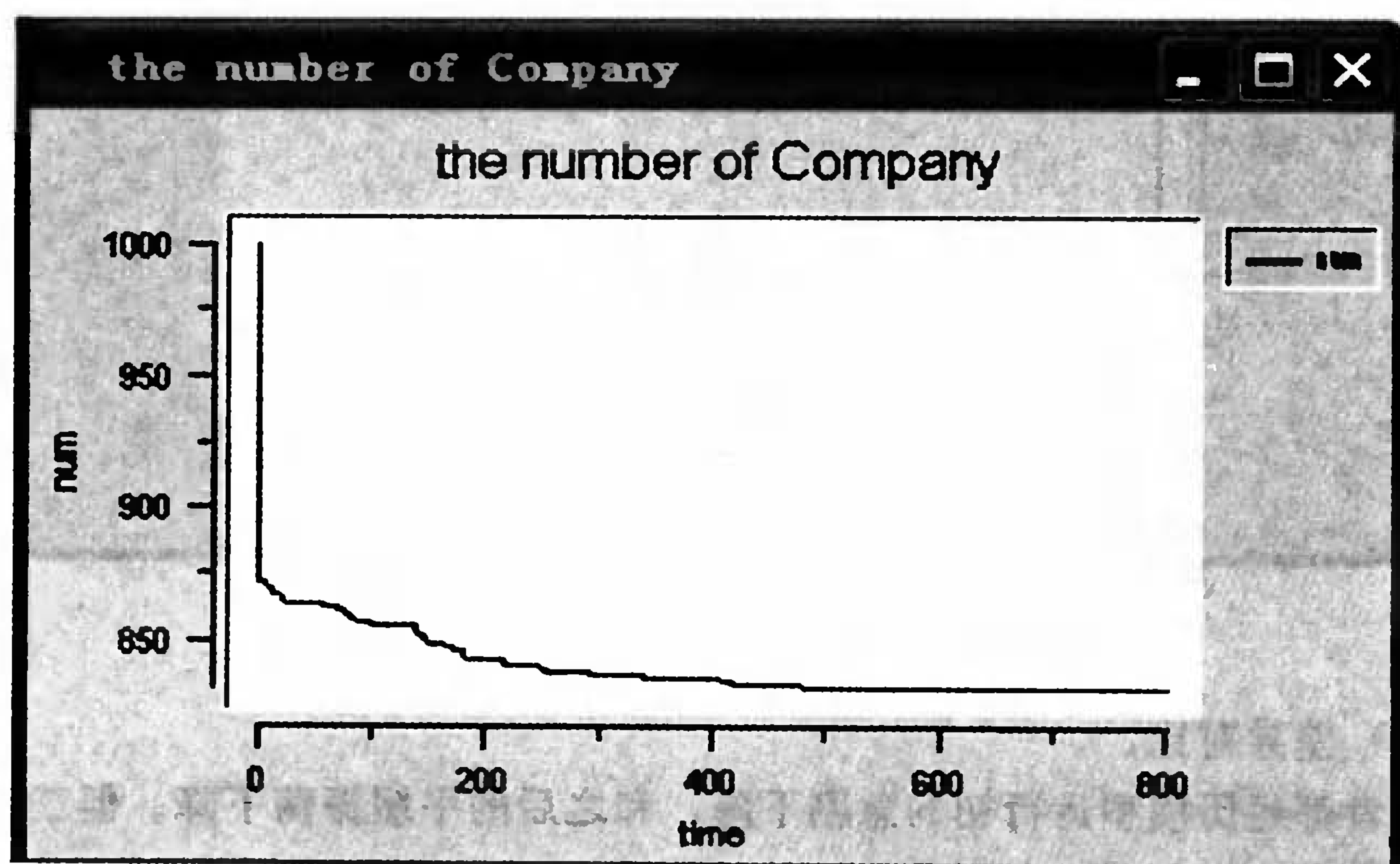


图 5—61 企业数量变化——汇率不变

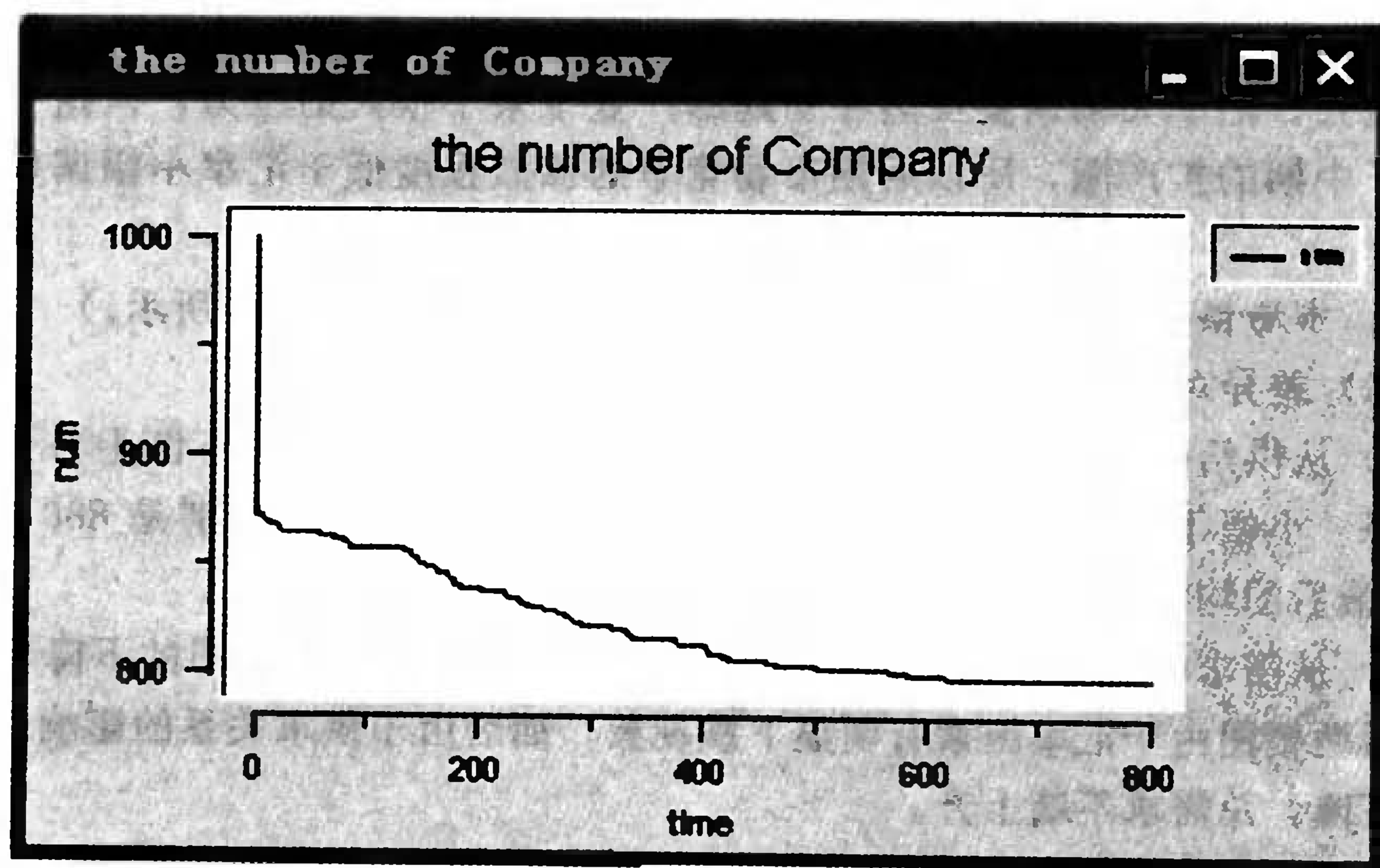


图 5—62 企业数量变化——汇率小幅变化

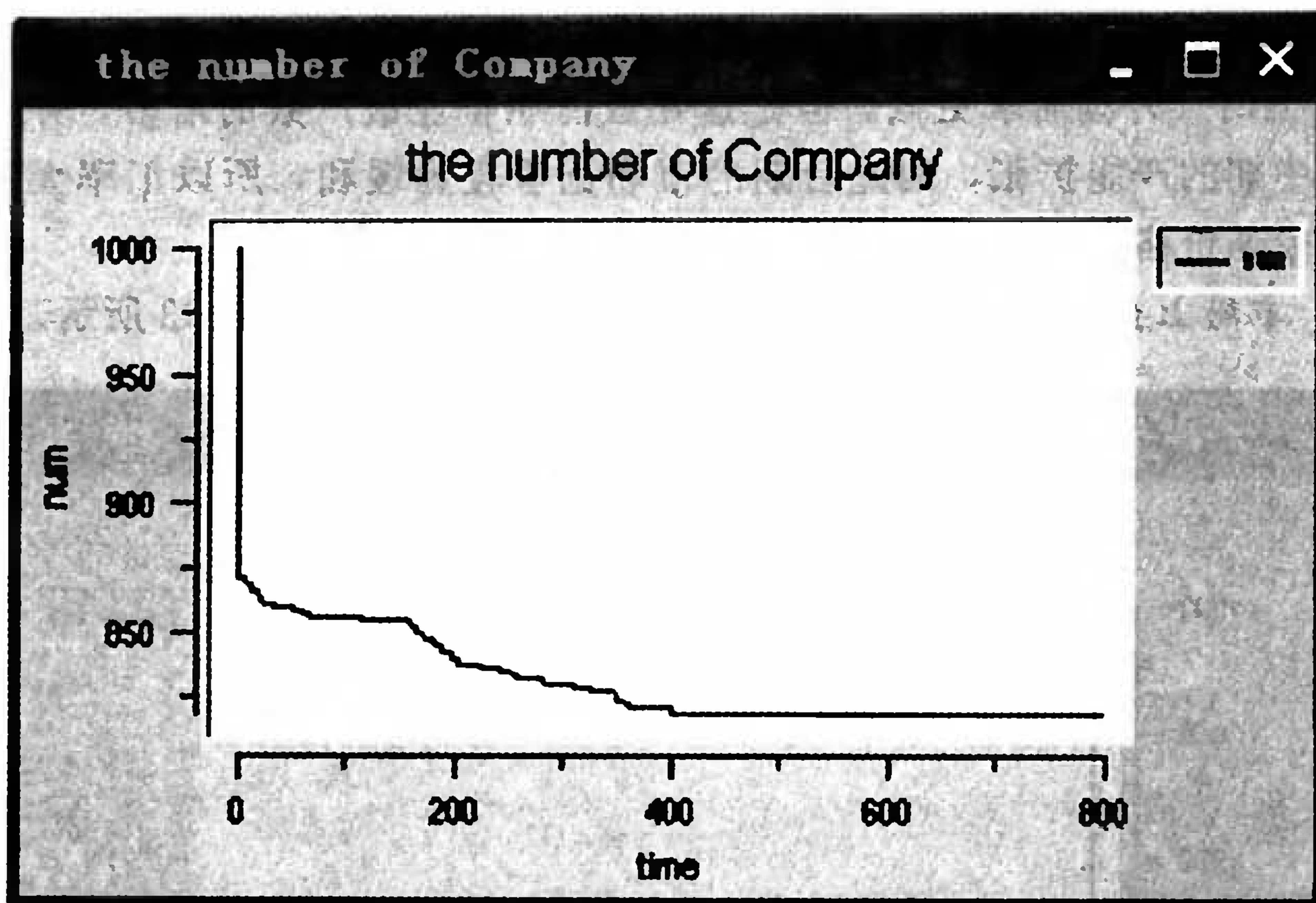


图 5—63 企业数量变化——汇率大幅变化

(1) 差异对比。

三者都经历模型运行初的急剧下降，和之后的平缓振荡下降。但三者最后的均衡数量大不相同，分别是：830，800 和 820

(2) 原因分析。

这一结果再次体现了与行业利润率相似的特征，汇率小幅调整对行业的影响最大。汇率大幅调整虽然在初期给产业带来了很大的压力，但这一压力抑制了中期的扩产潮，所以后期市场竞争的惨烈程度低于汇率小幅调整时的情况。

3. 市场供求关系曲线（如图 5—64，图 5—65 和图 5—66 所示。）

(1) 差异对比。

1) 从供给曲线看，三幅图的供给曲线都经历垂直下降、不断上升达到新的高峰、小幅下降这三个阶段。但三者的峰值大不相同，分别是 880，920，800，最后的均衡值分别是 870，860，780。

2) 从需求曲线看，初期都有不同程度的下滑，但第一幅图的下降非常微小，后两幅图由于汇率因素有明显下跌现象，而后由于供求关系的影响，价格不断下降，总需求不断上升。

(2) 原因分析。

这三幅图很好地解释了为什么小幅提高汇率对行业利润率和最后均衡价格

的影响最大。

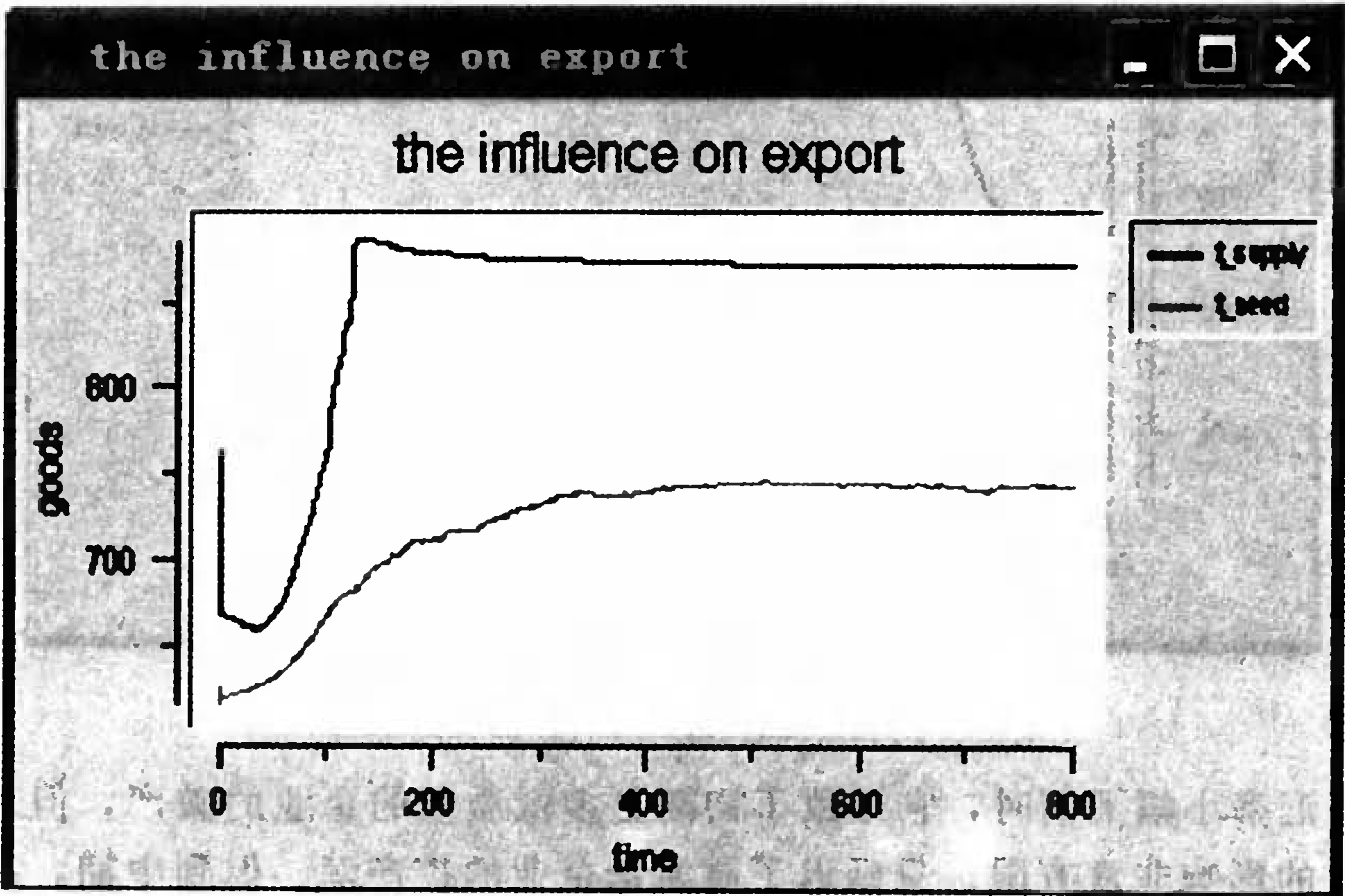


图 5—64 市场供需变化——汇率不变

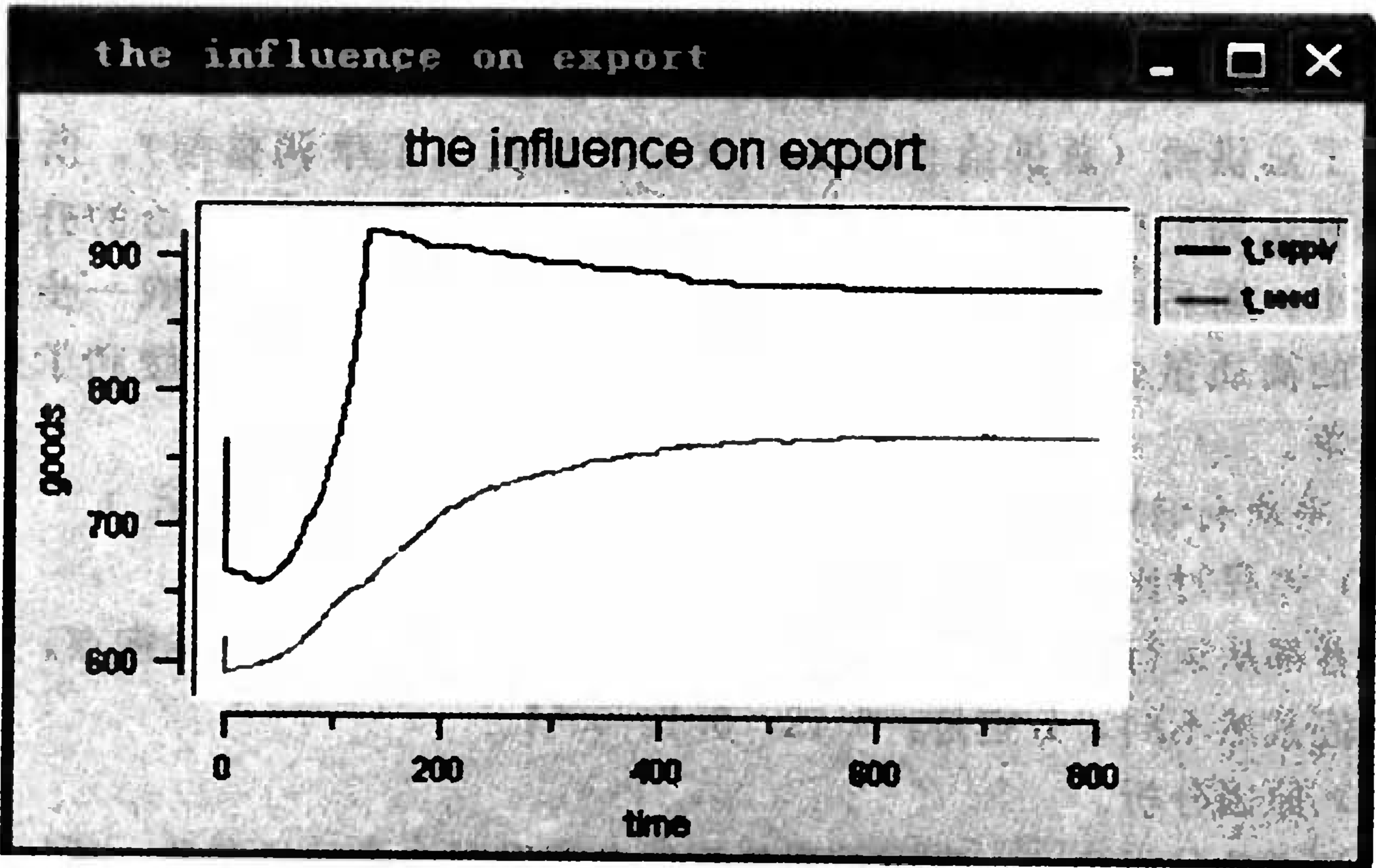


图 5—65 市场供需变化——汇率小幅变化

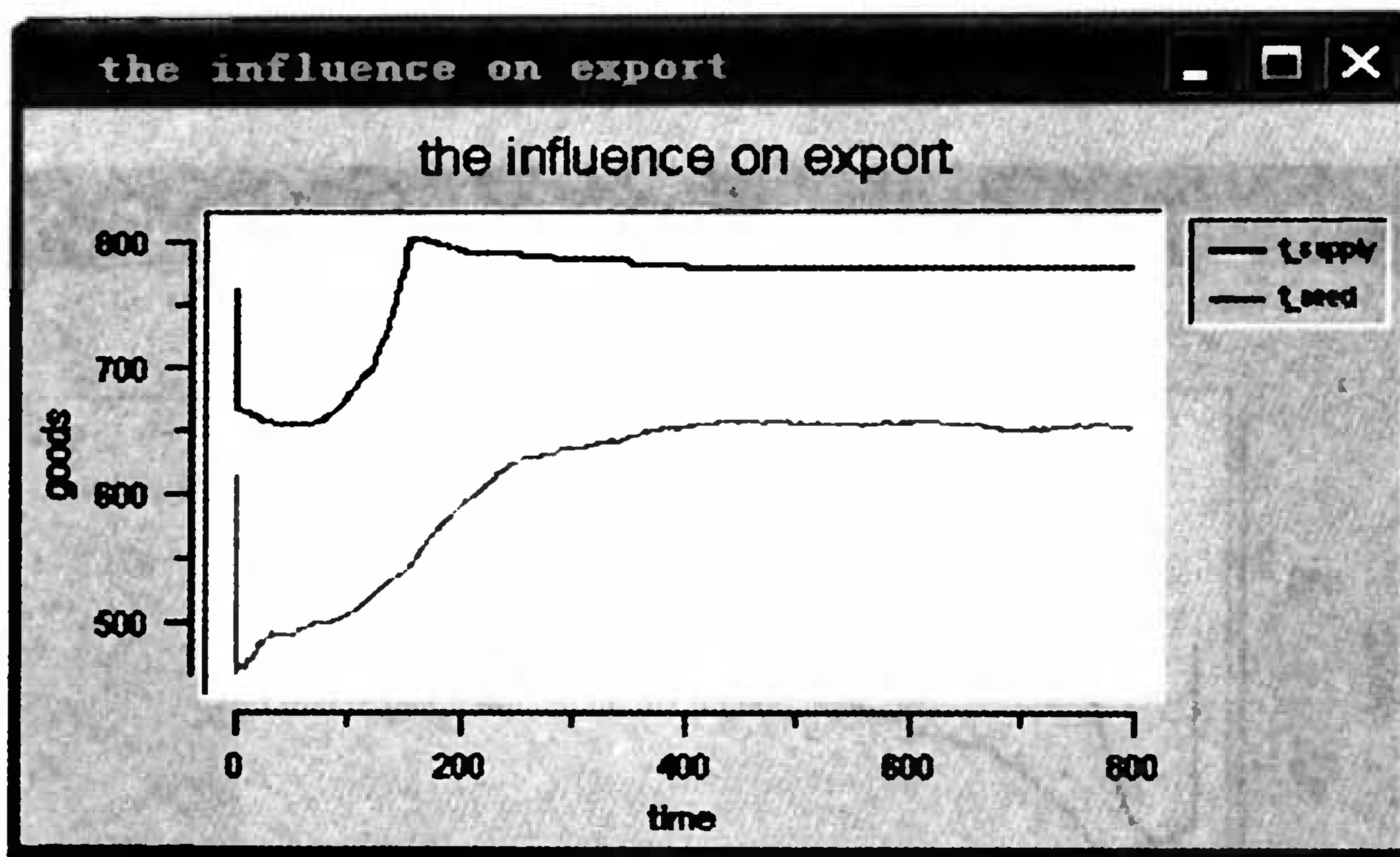


图 5—66 市场供需变化——汇率大幅变化

当汇率小幅下调时，它导致了初期更多低质量的企业破产，但对高质量企业的影响非常有限。只延迟了高质量企业的扩产潮。但到中期，高质量企业开始扩产时，由于初期企业数量的减少，使得这些存活下来的企业有了更宽松的扩产条件，导致产能的急剧扩大，并为后期的激烈竞争埋下伏笔。

当汇率大幅上调时，它不仅清除了市场上的低质量企业，由于它极大地影响了总供给（总供给直至 300 次后才恢复到汇率调整前），所以使得在中期时达到扩产能力的企业数大幅减少，因此其中期总供给的升幅在三者中最小。而后由于这些企业的扩产加剧了市场竞争，导致晚一步达到扩产条件的高质量企业失去了扩产的时机，未能扩产。但这也缓和了后期的市场竞争。

4. 平均利润率曲线（如图 5—67，图 5—68 和图 5—69 所示。）

（1）差异对比。

三者都从运行初期的垂直上升到后期不断下降，最后到达均衡点，但三者的均衡值截然不同，分别是：0.12，0.1，0.11。

（2）原因分析。

正如之前分析的，汇率小幅调整不仅未能遏制企业的扩产潮，还加剧了后期的竞争，导致最后均衡利润率的进一步下滑。而当汇率大幅上调时，由于遏制了扩产潮，所以后期竞争较小幅调整略微缓和。

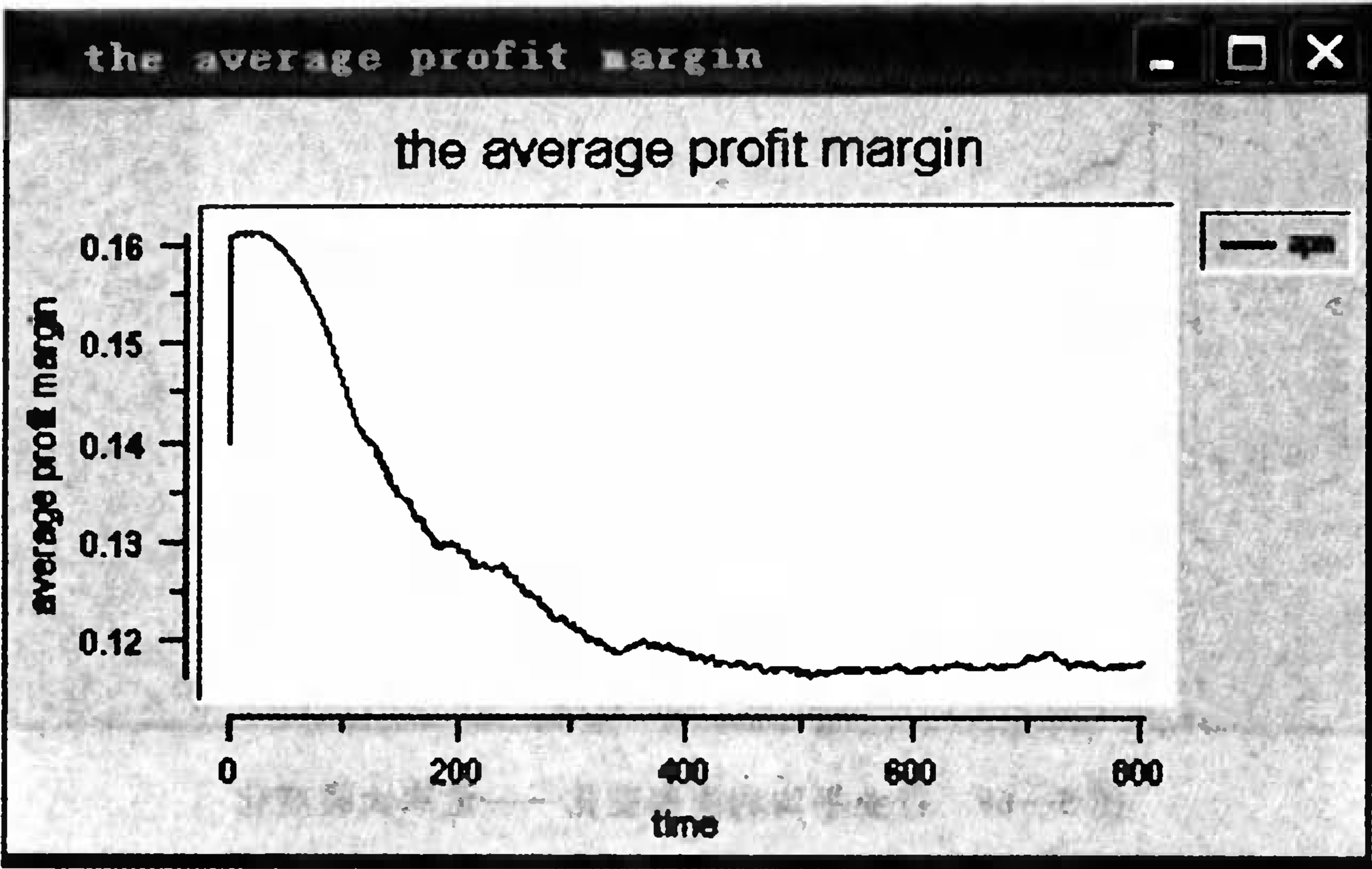


图 5—67 行业平均利润率变化——汇率不变

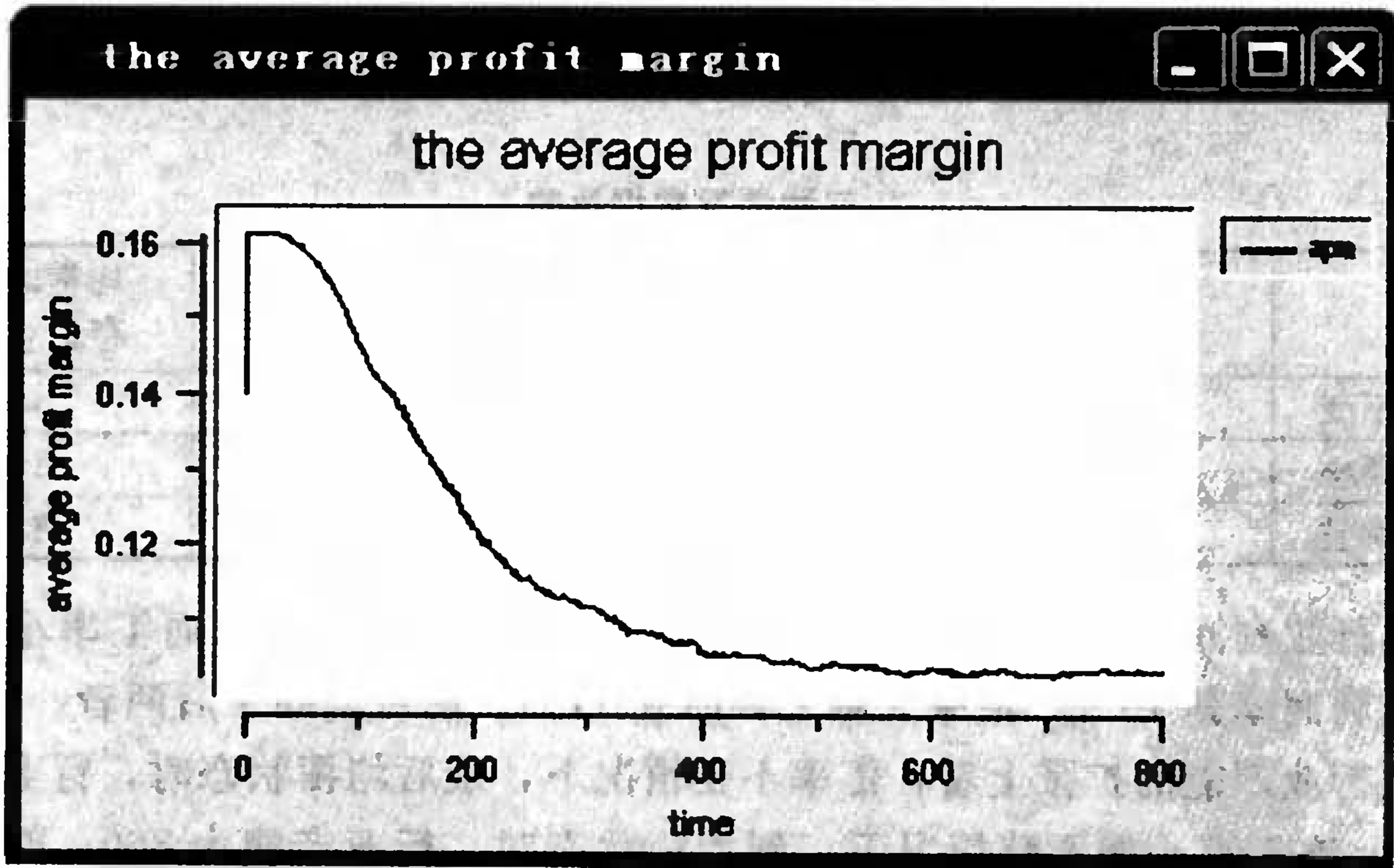


图 5—68 行业平均利润率变化——汇率小幅变化

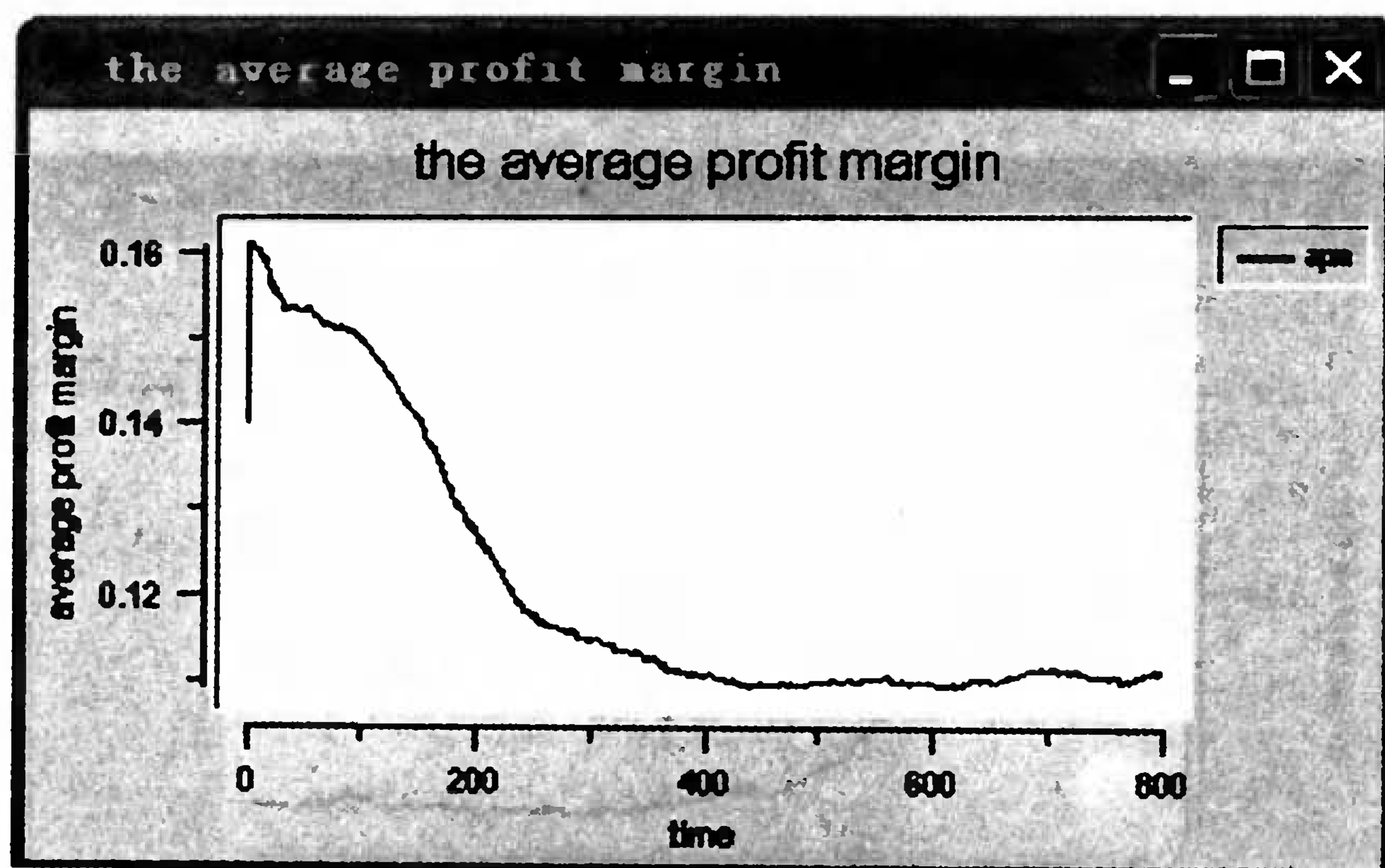


图 5—69 行业平均利润率变化——汇率大幅变化

总 结

通过以上对各种情况的运行结果的分析可知，汇率保持不变是最佳选择，无论是汇率小幅上调还是大幅上调，都会对产业构成巨大的损害。见表 5—9 所示。

表 5—9

三种情况数据比较

	均衡时行业 平均利润率	均衡平均售价 (本币价格)	均衡时最大 产能	均衡时市场 存活企业数
维持不变	12%	0.7	870	830
小幅调整	10%	0.6	860	800
大幅调整	11%	0.64	780	820

从行业利润率看，汇率不变时均衡行业利润率是 12%，而汇率小幅上调时均衡利润率是 10%，汇率大幅上调时是 11%。前者均高于后两者。

从行业产能的扩张上看，汇率不变情况下，最后均衡状态时，行业的产能为 870；在汇率小幅调整情况下，到均衡状态时，行业产能为 860；而汇率大幅调整时，均衡状态时行业产能仅为 780。

从市场上存活的企业数量看，汇率不变情况下，最后均衡状态时有 830 家企业存活；汇率小幅调整时，最后均衡状态时只有 800 家企业存活；汇率大幅调整时，均衡状态时有 820 家企业存活。

从商品行业均价看，三种情况下商品的人民币价格分别是：0.7，0.6，0.64。

综合上面四个经济指标，我们可以清楚发现，汇率保持不变时，企业不仅能以三种情况下最高的价格出售商品，还能使行业产能达到最大，即行业得到最大程度的扩张。不但行业利润率达到最高，还能有更多的企业避免破产的厄运。

而汇率小幅调整时，虽然行业的产能接近汇率不变时的产能，但商品的售价最低，行业利润率最低，损失了大量利润。这使得市场上有大量的企业破产。从社会层面上看，这将影响我国的就业状况和社会稳定。

汇率大幅调整时，虽然商品售价和行业利润率较汇率小幅调整好很多，也较接近汇率不变下的经济指标，但其行业产能仅为780，几乎等于模型运行初期的产能！也就是说汇率大幅调整状况下，整个行业经过漫长的一段时间后才达到汇率调整前的水平，而且行业利润率比汇率调整前还低3个百分点。

此外，从表格中的数据，我们还发现一个出乎意料的现象，即汇率大幅调整的多项经济数据优于小幅调整。如行业利润率，商品均价和市场存活企业数。究其原因，我认为极可能由于两种汇率上调方式对企业的影响力度不同造成的。

当汇率突然大幅调整时，它在初期将淘汰一大批企业，对其他的企业也构成极其剧烈的影响。但这段时期过后，生产的集中度会有大幅提高。这使得后期的竞争将大为缓和，而且这还降低企业决策的难度，因为由于信息不对称的存在，当市场上有大量经营状况相似的企业时，由于不知道其他企业将会做出什么决策，从而导致它们做出相同的判断和选择。例如在销售形势好转时一窝蜂的扩大产能。从而导致后期出现伤害整个行业发展的恶性竞争。

而当汇率小幅调整时，由于调整幅度有限，它并不能起到大幅促进优胜劣汰的作用，只能恶化所有企业经营状况，使更多企业处于破产边缘。而这些处于破产边缘的企业为了避免破产，会挑起一轮又一轮的恶性竞争。这对行业的发展会有极大的破坏。

面向21世纪课程教材 Textbook Series for 21st Century

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材

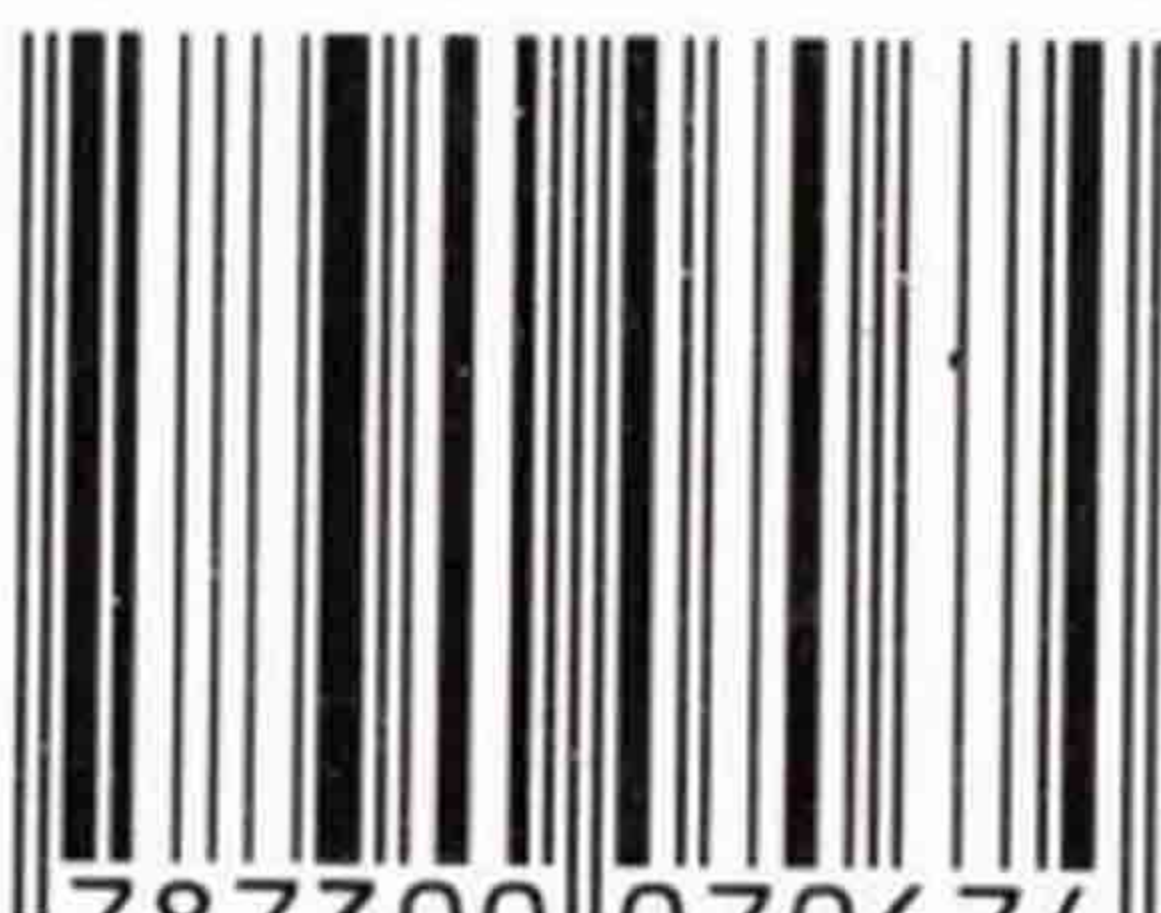
书 目

- 信息管理与信息系统概论 陈禹 杨波 编著
电子商务理论与实践 方美琪 付虹蛟 编著
信息系统管理 陈国青 郭迅华 编著
决策支持系统与知识管理系统 李东 蔡剑 著
信息安全的理论与方法 贾 晶 编著
复杂系统建模与仿真 方美琪 张树人 编著
系统科学与方法概论 陈禹 钟佳桂 编著
电子政务 侯卫真 编著
计算机网络基础 张基温 编著
信息系统开发与管理 邝孔武 王晓敏 编著
数据结构与数据管理 苏俊 著

人大社经济图书网址: www.rdebook.com
(了解图书出版信息, 下载教学辅助材料)

策划编辑 潘旭燕
高晓斐
责任编辑 杨建国
潘旭燕
封面制作 侯 静
版式设计 赵星华

ISBN 7-300-07067-1



9 787300 070674 >

ISBN 7-300-07067-1/F · 2337
定价: 22.00元